



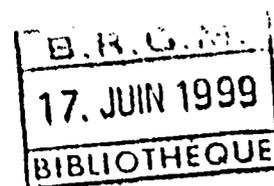
Ministère de l'Industrie,
de la Poste et des
Télécommunications



MINISTÈRE DE
L'ENVIRONNEMENT

DOCUMENT PUBLIC

*Les résidus miniers français :
typologie et principaux impacts
environnementaux potentiels*



Etude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 96-F-211

juin 1997
R 39503



Mots clés : Résidus miniers, Environnement, Impact environnemental, Mines, Typologie, Stériles, Réactifs de traitement.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

BRGM (1997) - Les résidus miniers français : typologie et principaux impacts environnementaux potentiels. Rap. R 39503, 83 p., 14 fig., 10 tabl., 1 ann.

© BRGM, 1997, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

A la demande du ministère de l'Environnement (DPPR), le BRGM a été chargé, dans le cadre de ses activités de Service Public (Fiche Programme 96-F-211), d'effectuer *la première phase* documentaire d'une étude sur l'importance et la nature des résidus miniers en France, et leurs conséquences éventuelles en terme d'impact sur l'environnement. Dans cette étude préliminaire, la mission confiée par le ministère a porté surtout sur les mines actuelles et anciennes de tous les métaux et minéraux industriels ayant fait l'objet d'une exploitation significative sur le territoire français, sauf l'uranium, le charbon et la potasse. Les exploitations de granulats, de matériaux de construction et de voirie ont également été exclues de l'enquête préliminaire. L'étude a été en outre limitée au territoire métropolitain, excluant les DOM-TOM qui présentent des problèmes spécifiques.

Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude initiale est, grâce à une étude bibliographique multidisciplinaire*, de fournir les informations nécessaires à la définition détaillée du contenu et des limites de l'enquête complète, et à la démarche à utiliser pour son accomplissement. Plus particulièrement, cette étude générale fournira :

- une typologie sommaire des résidus miniers et de leurs impacts éventuels sur l'environnement ;
- un inventaire des études partielles ou ponctuelles réalisées à ce jour, notamment au BRGM ;
- une première approche bibliographique des aspects législatifs, réglementaires et normatifs.

* En raison du temps imparti pour cette étude préliminaire, seuls les documents disponibles sur le site central du BRGM (Orléans) ont été consultés.

Spécificités adoptées

Un poids important a été donné dans cette étude aux mines de métaux de base, d'antimoine et d'or. Cette focalisation reflète à la fois la nature plus exhaustive des connaissances sur les impacts environnementaux que peuvent avoir les exploitations de ce type par rapport à celles de minéraux industriels, la spécificité des dossiers miniers actuellement à traiter par les instances publiques et cités dans la demande du ministère (Salsigne, Châtelet, anciens mines en région Midi-Pyrénées), et enfin la nature des documents disponibles sur le site d'Orléans. Toutefois, la complexité des associations minérales naturelles (décrites dans ce rapport) rend caduque toute simplification abusive dans ce domaine, et la phase 2 de l'enquête devra tenir compte de tout le spectre des problématiques dans ce domaine.

Différence entre Mines anciennes et Mines en activité ou récemment fermées

Dans la présente étude, on a traité de façon prioritaire les problèmes posés par les mines anciennes. En effet, leur cas est fondamentalement très différent de celui des mines qui sont actuellement en activité ou qui ont été fermées récemment. Sur celles-ci, la surveillance exercée par les DRIRE auprès des exploitants et les mesures prises par ces derniers concourent à la conformité environnementale des résidus d'exploitation. En particulier, de nombreux textes législatifs existent concernant les résidus des mines actuelles, les mesures les concernant relèvent d'arrêtés préfectoraux détaillés, les solutions techniques ont été trouvées et sont appliquées. De la sorte, les mines récentes, au demeurant parfaitement répertoriées, ne peuvent être que ponctuellement un sujet de préoccupation pour l'administration centrale. Les mines anciennes, elles, sur lesquelles on ne dispose au mieux que d'archives parfois fragmentaires pour retracer les pratiques successives de traitement, constituent un champ beaucoup plus vaste et jalonné de beaucoup moins de repères, pour lesquels un programme de fond semble nécessaire avant de parvenir à un degré de connaissance adapté aux besoins.

Sommaire

1. Notions préliminaires	11
1.1. La mine : activité génératrice des résidus miniers	12
1.1.1. "Gisement" et "stérile" : deux concepts complémentaires.....	12
1.1.2. Les types d'exploitation minière	14
1.1.3. Les phases et opérations d'exploitation.....	15
1.2. Les principaux types de résidus miniers.....	17
1.2.1. Les stériles francs de découverte.....	17
1.2.2. Les résidus d'exploitation (stériles de sélectivité).....	17
1.2.3. Les résidus de traitement	18
1.2.4. Autres types de résidus	18
1.3. Les impacts environnementaux potentiels.....	20
1.3.1. La notion "relative" d'impact environnemental.....	20
1.3.2. Les principaux facteurs déterminants.....	21
1.3.3. Les principaux types d'impact environnemental	24
2. La mine en France et la production de résidus miniers	27
2.1. Panorama historique de la production minière française	27
2.2. Les sites miniers français.....	33
2.3. Estimation des quantités de résidus miniers.....	34
2.3.1. Approche globale et théorique	36
2.3.2. L'approche de terrain	39
2.4. Vue rapprochée : deux exemples de sites miniers à résidus.....	41
3. Les éventuels contaminants présents dans les résidus miniers	45
3.1. Les stériles de sélectivité "minéralisés"	45
3.1.1. Le cas particulier du "drainage minier acide"	45
3.1.2. Les éléments potentiellement toxiques.....	47

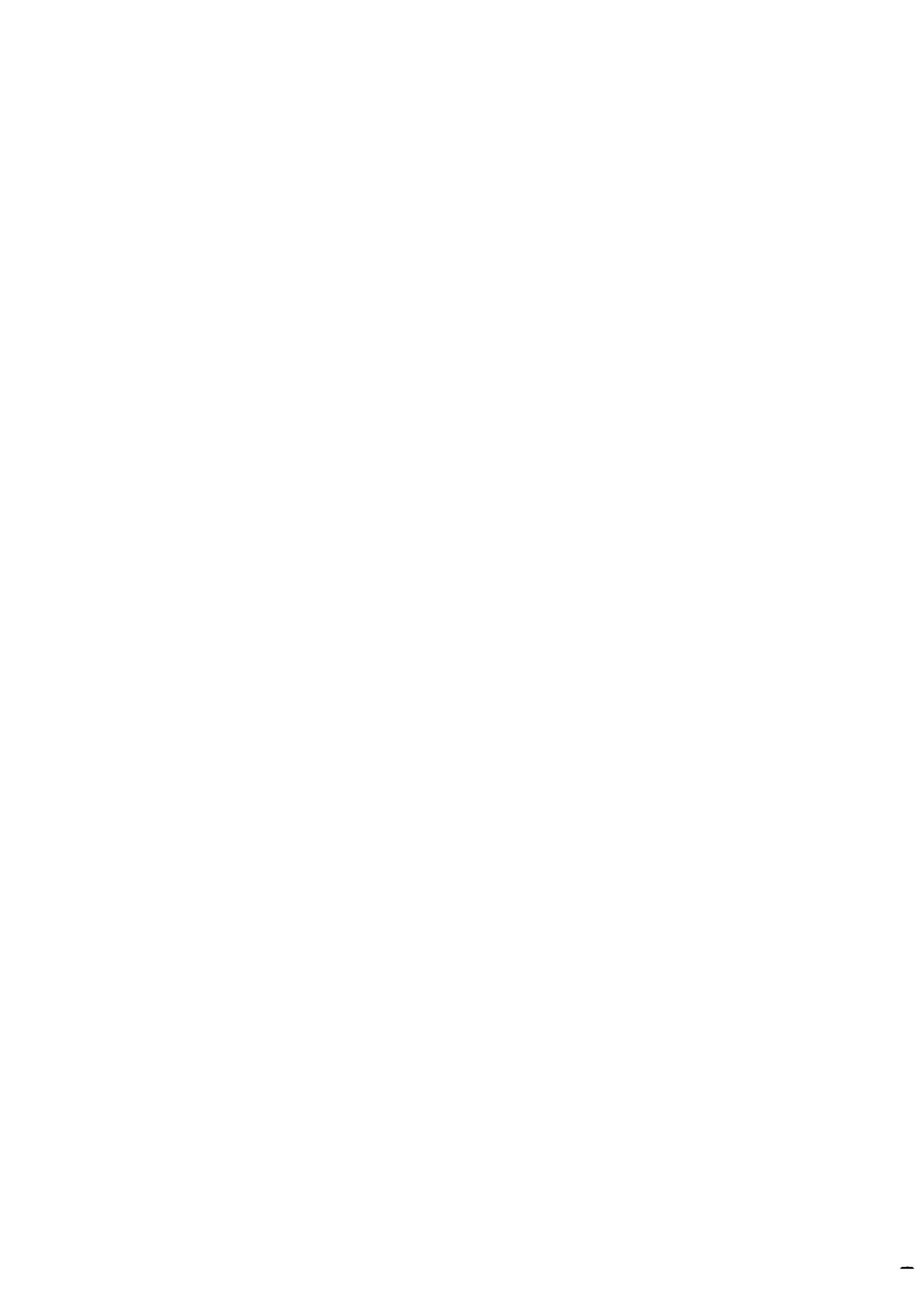
3.2. Les résidus de l'usine de traitement du minerai	49
3.2.1. Introduction.....	49
3.2.2. Rappels sur les principales techniques de traitement	49
3.2.3. Quelques filières de traitement types	52
3.2.4. Commentaire sur le devenir des réactifs de traitement	57
3.2.5. Stockage des résidus de traitement.....	59
4. Typologie des résidus miniers dans une perspective environnementale.....	61
4.1. Facteurs et principes typologiques globaux	61
4.2. Tableaux typologiques et récapitulatifs	62
4.3. Quelques exemples de constats d'impacts résiduels d'anciennes mines	64
5. Revue sommaire des aspects réglementaires concernant les résidus miniers.....	71
5.1. Spécificité des résidus miniers en matière réglementaire	71
5.2. Les principaux textes	71
5.3. Différences entre mines anciennes et mines en activité ou récemment fermées	73
6. Bibliographie sommaire.....	75
Annexe : proposition de glossaire.....	79

Liste des figures

Fig. 1 - Travaux et opérations d'une exploitation minière.....	13
Fig. 2 - Etapes d'exploitation d'un gisement métallique et les résidus miniers correspondants	16
Fig. 3 - Exemples de stockage de résidus de traitement	19
Fig. 4 - Facteurs déterminant le risque d'impact environnemental d'un résidu minier .	22
Fig. 5 - Voies de dispersion dans l'environnement de polluants provenant des résidus solides miniers	23
Fig. 6 - Production française de bauxite, fluorine et barytine	30
Fig. 7 - Production française de plomb/zinc et d'or.....	31
Fig. 8 - L'activité minière en 1994. Carte des principaux centres d'extraction.....	35
Fig. 9 - Résultats d'une enquête sur 103 sites du N Massif central (1984).....	42
Fig. 10 - Résidus de l'usine de traitement de minerai (laverie) de deux mines métalliques anciennes.....	44
Fig. 11 - Schéma des filières utilisées dans une usine de traitement de minerai de Pb/Zn.....	54
Fig. 12 - Schéma des filières utilisées dans une ancienne usine de traitement de minerai d'or.....	56
Fig. 13 - Schéma global des processus éventuellement déterminant le flux de réactifs de traitement (et d'autres contaminants originaires du minerai) vers l'environnement.....	58
Fig. 14 - Certaines relations de "cause à effet" susceptible d'influencer l'impact environnemental des résidus miniers.....	63

Liste des tableaux

Tabl. 1 -	Productions et ressources métropolitaines.....	32
Tabl. 2 -	Les mines métalliques - approche quantitative.....	37
Tabl. 3 -	Les minéraux industriels - approche quantitative.....	38
Tabl. 4 -	Evaluation théorique des résidus de traitement de la mine métallique.....	40
Tabl. 5 -	Phases minérales des minerais français et le spectre d'éléments traces fréquemment associés.....	48
Tabl. 6 -	Techniques de traitement de minerai et réactifs potentiels susceptibles d'entraîner un risque environnemental.....	53
Tabl. 7 -	Quelques exemples de consommation de réactifs pour des circuits de traitement de minerais de Pb-Zn ayant fonctionné vers 1962.....	53
Tabl. 8 -	Typologie des résidus miniers en termes de caractéristiques globales.....	64
Tabl. 9a -	Typologie de certaines substances métalliques exploitées, en termes de caractéristiques du gisement et d'exploitation.....	65
Tabl. 9b -	Typologie de certaines substances industrielles exploitées, en termes de caractéristiques du gisement et d'exploitation.....	66
Tabl. 10 -	Typologie des stériles minéralisés et des résidus de traitement.....	67



1. Notions préliminaires

Les *résidus miniers* peuvent être définis comme tout produit ou dépôt qui résulte de la recherche et de l'exploitation minière ou du traitement du minerai ; ces résidus peuvent être des produits naturels (stériles francs, produits minéralisés non exploitables) ou des produits artificiels, plus ou moins transformés, issus des phases de traitement et d'enrichissement du minerai (rejets de laverie, scories) contenant d'éventuels additifs chimiques, minéraux ou organiques. Comme nous le verrons, la nature et l'importance des éventuels impacts qu'un résidu minier peut avoir sur l'environnement seront fonction de :

- sa quantité totale ;
- sa composition chimique et minéralogique ;
- ses caractéristiques physiques ;
- la méthode de stockage et sa localisation dans un contexte environnemental particulier.

Ces différents aspects sont fortement influencés par les caractéristiques de la mine elle-même :

- la substance exploitée ;
- la nature du gisement ;
- sa taille et la méthode d'exploitation utilisée ;
- les procédés de traitement du minerai employés ;
- sa localisation dans un contexte environnemental particulier.

Nous nous proposons donc, avant d'aborder les paramètres indispensables à l'élaboration d'une typologie des résidus miniers dans une optique de leur impact éventuel sur l'environnement, de :

- décrire sommairement les caractéristiques principales de l'activité génératrice des résidus miniers "**la mine**" ;
- définir l'objet de l'étude "**résidu minier**" ;
- présenter les principaux **types d'impact** que les résidus miniers peuvent avoir sur l'environnement et soulever la notion "**relative**" d'impact environnemental.

Enfin, l'étude des résidus miniers faisant appel à la fois aux vocabulaires de la mine et de la gestion des sites pollués, il nous a paru utile de réunir dans **un glossaire** les mots ou les expressions relevant de ces deux domaines (cf. ann.).

1.1. LA MINE : ACTIVITE GENERATRICE DES RESIDUS MINIERES

Une mine (fig. 1) comprend tous les aménagements, ouvrages et équipements d'extraction, installations de traitement de minerai, haldes de stockage provisionnels et permanents de matériaux et/ou de résidus nécessaires pour l'exploitation et la valorisation d'un gisement.

1.1.1. "Gisement" et "stérile" : deux concepts complémentaires

Un gisement ne se définit pas en termes absolus, mais en termes relatifs à un marché économique. En effet, un gisement est une masse minérale, *le minerai*, ayant une concentration en un ou plusieurs éléments métalliques ou non métalliques assez importante pour être exploitable *avec profit dans un contexte économique précis*. Les caractéristiques du gisement sont déterminées par les processus géologiques et/ou géochimiques responsables de sa création. En effet, un gisement représente une anomalie dans la composition chimique de la croûte terrestre : il contient bien évidemment une concentration élevée en un ou plusieurs éléments valorisables (Au, Zn, Pb, Ni, Al, etc.) ; il contient souvent aussi des concentrations élevées en éléments accompagnateurs pouvant poser des risques pour l'environnement (pyrite, arsenic, métaux lourds, etc.).

L'enveloppe géométrique du gisement est définie par *la teneur de coupure* choisie pour exploiter la substance valorisable. Un gisement est donc un objet à masse et à composition variable dans le temps : il peut diminuer, voire disparaître, si le cours du marché du produit de la mine descend en dessous de son prix de revient ; en revanche, il peut réapparaître ou devenir plus important dans le cas contraire. Pour survivre économiquement, une mine doit donc être toujours à la recherche de méthodes d'extraction et de valorisation permettant la production d'un produit final vendable à profit suffisant ; souvent ces évolutions entraîneront une évolution dans la nature et la quantité des résidus produits. En fonction de leur nature physico-chimique, de la quantité et de la méthode de stockage, les résidus d'une mine peuvent avoir des impacts quasi nuls à très importants sur l'environnement. Pour les mines en opération ou en cours de fermeture, le coût lié à la maîtrise de l'impact sur l'environnement de certains de ces résidus peut constituer un poids non négligeable sur le prix de revient.

Par ailleurs, la définition d'un "gisement" -cible d'une activité minière- mène tout naturellement à la définition du concept complémentaire, celui du "stérile". Ce terme, utilisé souvent comme nom ou qualificatif dans le domaine minier, s'applique à tout résidu minier dont *la teneur en élément valorisable est en dessous de la teneur de coupure*. Le résidu est donc "stérile" en termes de valeur économique. Dans certains cas, un résidu "stérile" stocké à une époque peut être réexploité à une autre, suite à un changement approprié des conditions économiques (cours du marché, nouvelles filières de traitement).

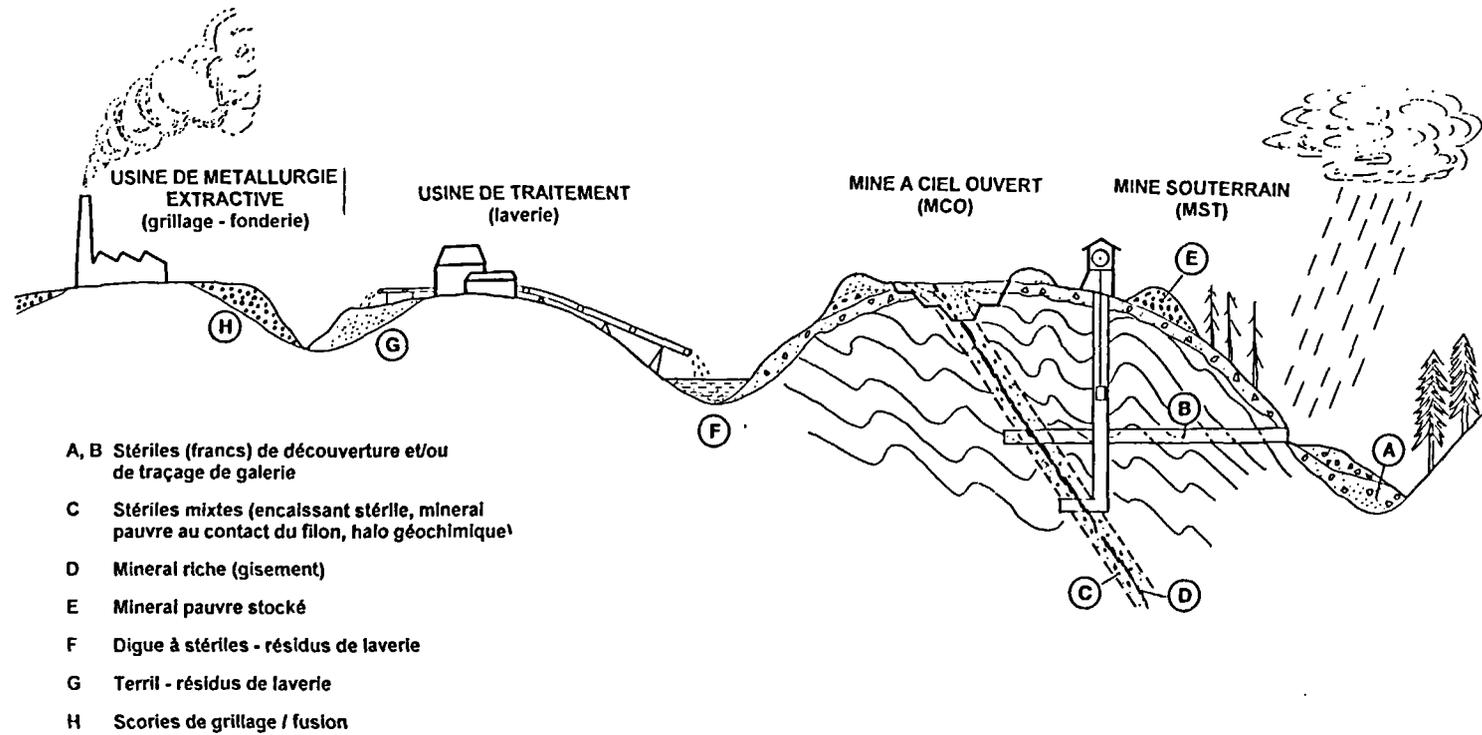


Fig. 1 - Travaux et opérations d'une exploitation minière.

Un résidu économiquement "stérile" peut, par contre, contenir des concentrations en éléments ou composés chimiques polluants (phases minérales naturelles, réactifs de traitement résiduels) élevées par rapport aux concentrations naturellement présentes dans les sols du site. Dans ce cas, on parlera de "**stériles de sélectivité**". Nous pouvons aussi avoir des résidus miniers dont la composition et la réactivité chimique diffèrent peu de celles des sols naturels ; ce sont les "**stériles francs**".

Les caractéristiques du gisement, définies par la variation dans l'espace de la teneur en métal, peuvent être très différentes d'un cas à un autre ; en particulier, nous pouvons citer les deux cas extrêmes : gisements de type "tout ou rien" et "disséminé". Dans le premier cas, la frontière entre le gisement et la roche stérile encaissante est très nette ; on passe d'une teneur en métal élevée à une teneur proche du fond géochimique en très peu de distance, parfois en quelques centimètres. A l'autre extrême se trouvent les gisements du type "disséminé" caractérisés par une variation progressive de la teneur en métal en s'éloignant d'une zone dont la concentration est économiquement intéressante, traversant un halo de teneurs de plus en plus faibles.

1.1.2. Les types d'exploitation minière

La situation topographique, la géométrie et la morphologie du gisement détermineront la méthode minière utilisée pour son exploitation (cf. paragraphe suivant) et ainsi, les tonnages relatifs et la composition chimique des résidus générés lors des différentes phases de travaux miniers.

a) Mines à ciel ouvert

Lorsqu'un gisement est peu profond, une exploitation "*à ciel ouvert*" peut être envisagée.

L'exploitation d'un minerai à ciel ouvert est décidée en fonction du taux de découverte (ratio du volume de roche stérile qui doit être enlevé par volume de minerai), et n'est réalisable généralement que pour des minerais peu profonds (<300 m). En général, après les travaux de décapage (enlèvement du sol et horizons superficiels), les travaux de découvertures concernent la partie stérile de la roche renfermant (ou "encaissant") le minerai. Cette dernière est enlevée par gradins successifs dans une excavation souvent de forme conique dont les parois découpées en banquettes sont plus ou moins redressées suivant la tenue des roches. Plus l'excavation s'approfondit, plus le volume de stérile à extraire est important. Lorsque le taux de découverte devient trop important une exploitation à ciel ouvert n'est plus rentable.

b) Mines souterraines

Dans les cas où une mine à ciel ouvert n'est pas possible, et si les teneurs du minerai le permettent, une exploitation en "*mine souterraine*", méthode plus coûteuse, peut être mise en oeuvre.

Dans ce cas l'accès au minerai se fait par une ou plusieurs descenderies ou galeries (cf. fig. 1). Si le gisement comporte une ou plusieurs couches de minerais horizontales dans une région à paysage plat, la desserte des galeries et la ventilation sont assurées au minimum par deux puits : l'un pour évacuer le minerai (skips) et l'autre pour le personnel, l'aération et l'exhaure des eaux. Dans le cas d'un gisement très redressé en zone de montagne, plusieurs galeries horizontales peuvent être tracées à partir du flanc de la colline, les "travers bancs", pour rejoindre le minerai.

1.1.3. Les phases et opérations d'exploitation

Comme le montre le schéma bloc donné figure 2, les opérations mises en oeuvre sur un site minier pour exploiter et valoriser un gisement peuvent être divisées en trois (ou parfois quatre) étapes principales :

- les travaux nécessaires pour *donner accès au gisement* : l'ampleur de ces travaux de déblaiement (ou de découverte) dans le cas d'une mine à ciel ouvert et de percement de galeries, puits ou descenderies pour une mine souterraine varieront énormément en fonction des caractéristiques du gisement. Les mines à ciel ouvert produisent en général beaucoup plus de stériles (en moyenne, de l'ordre de 10 fois plus) que les mines souterraines davantage sélectives.
- les travaux liés à *l'extraction du minerai "tout venant" et à son tri préliminaire* (éventuellement nécessaire pour minimiser la quantité de roche stérile, ou "gangue", présente dans le minerai "run of mine") ;
- un ensemble de *filières de traitement*, regroupé dans une *usine d'enrichissement* (souvent appelé "la laverie") utilisé pour séparer les phases minérales porteuses des éléments valorisables de la gangue stérile ; le produit de l'usine, enrichi en élément valorisable, s'appelle "*le concentré*". Dans la plupart des cas, ce dernier constitue le produit marchand de la mine.
- dans certains cas, lors des exploitations anciennes, *une fonderie ou une usine de grillage* pouvait être édifiée à proximité de un ou plusieurs sites miniers voisins pour transformer l'élément valorisable du concentré en forme métallique, d'où il a pu résulter l'abandon de produits de grillage/fusion sur le site.

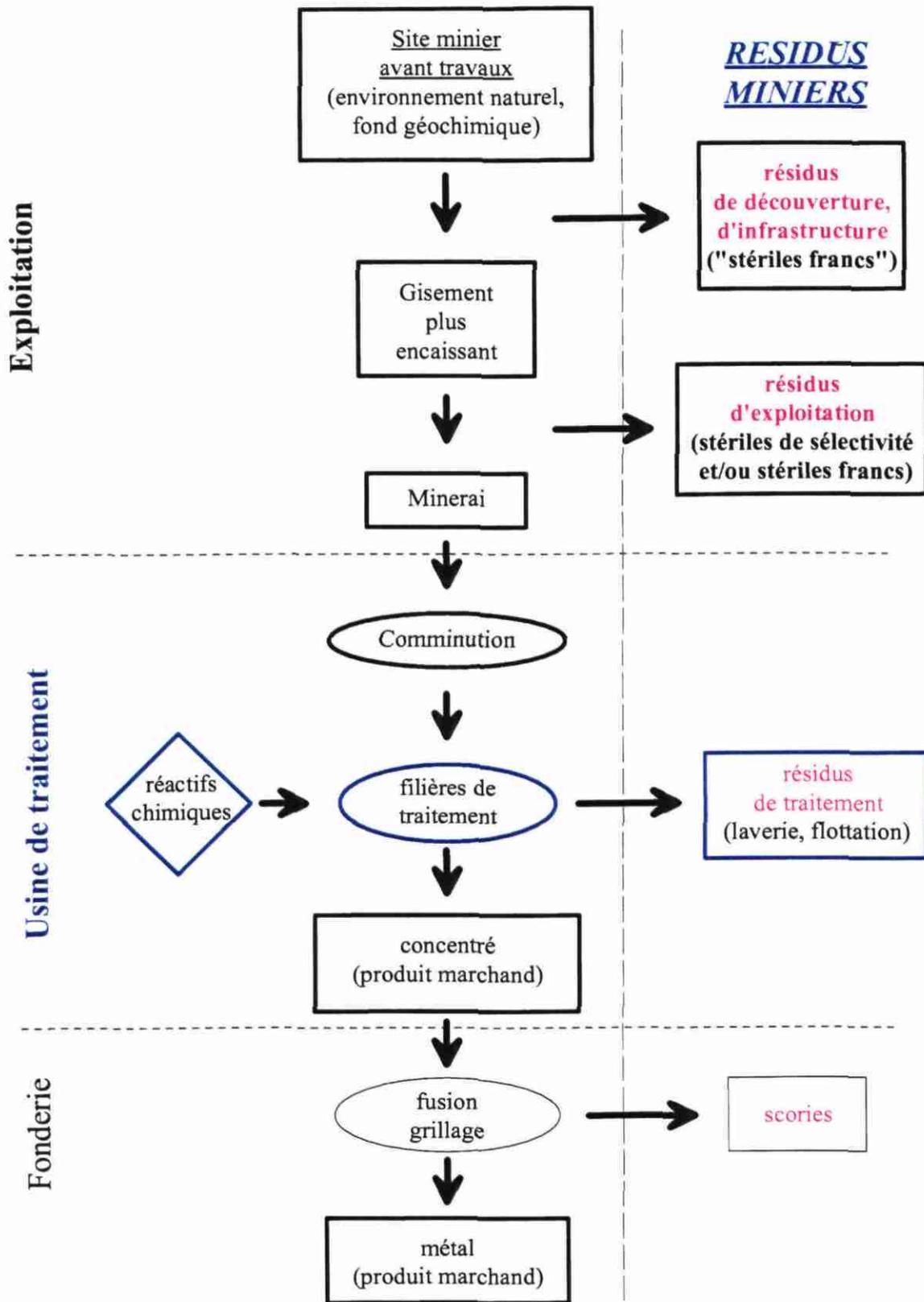


Fig. 2 - Etapes d'exploitation d'un gisement métallique et les résidus miniers correspondants.

1.2. LES PRINCIPAUX TYPES DE RESIDUS MINIERES

Chacune des étapes d'exploitation peut être génératrice de résidus miniers, généralement de caractéristiques physiques et chimiques, donc d'impact environnemental potentiel, assez différentes. Leurs volumes respectifs, surtout en ce qui concerne les résidus de découverte, seront fonction aussi du type d'exploitation (mine à ciel ouvert, mine souterraine) ; leur composition chimique variera en fonction de la substance exploitée et la nature du gisement.

En premier lieu, nous pouvons classer les principaux types de résidu minier en quatre grands groupes :

- les stériles francs de découverte et/ou de traçage de galerie,
- les résidus d'exploitation (stériles francs et/ou stériles de sélectivité minéralisés),
- les résidus de traitement (rejets de l'usine d'enrichissement),
- autres résidus (scories de grillage ou de fusion du minerai).

1.2.1. Les stériles francs de découverte

Ce sont les sols et morts terrains qui recouvrent le minerai, décapés pour une mise en exploitation à ciel ouvert, ou les matériaux stériles extraits lors du percement de galeries, puits ou descenderies (Fig. 1-A,B) dans le cas d'une mine souterraine.

Ces résidus contiennent en règle générale des teneurs en métaux et en éléments accompagnateurs faibles, de l'ordre de grandeur de l'anomalie géochimique produite par les phénomènes de dispersion naturelle, remaniement mécanique ou diffusion chimique des métaux du minerai dans sa roche encaissante. D'une certaine façon, les caractéristiques physiques et chimiques de ce genre de résidu ne se différencieront pas de celles des matériaux qui auront été remaniés lors de la construction de tout autre ouvrage d'art (autoroute, tunnel, barrage, etc.) dans le même contexte régional.

1.2.2. Les résidus d'exploitation (stériles de sélectivité)

Lors de l'exploitation, le mineur opérera un tri précoce entre le minerai vendable et le minerai pauvre où la récupération des substances valorisables sera non économique dans tel contexte. Ce minerai pauvre pourra être stocké sur place, dans l'attente d'un traitement éventuel si les cours du métal venaient à monter. Dans les mines anciennes, la pratique était parfois de le mettre à part, ou de le rejeter de la même façon que les autres résidus de la mine (Fig. 1-C, E). Dans le cas de mines modernes de métaux de base, les stocks de ce type de résidu sont souvent traités en fin d'exploitation.

Le caractère plus ou moins disséminé d'un gisement conditionnera également la technique d'exploitation, donc le volume, la nature et l'importance des résidus d'exploitation. Dans un gisement de fer de type "disséminé" par exemple, l'exploitant

placera la teneur limite d'exploitation du minerai à une valeur donnée (p. ex. 28 % en fer). Cette limite est opérationnelle seulement quand la masse minérale exploitée présentera une gamme continue de teneurs décroissantes en fer suivant les conditions géologiques responsables de sa formation. Le résidu minier dans ce cas aura, en effet, des teneurs en métal très voisines du minerai. Par contre pour les gisements de type "tout ou rien", il y a discontinuité géochimique brutale entre le minerai et sa gangue, celle-ci ne contenant plus que de faibles anomalies en métaux (approchant à peine le centième de la teneur du minerai). Dans ce cas, une exploitation du minerai, ne laissera que des rejets pauvres, plus ou moins contaminés par des métaux et métalloïdes accompagnateurs du gisement.

1.2.3. Les résidus de traitement

La valorisation du minerai vendable consiste à effectuer plusieurs opérations de pré concentration du ou des minéraux économiques (cf. chapitre 3). Ces opérations produisent plusieurs types de solides : l'un enrichi en substances valorisables (le "concentré") et un ou plusieurs qui en sont appauvris. Dans le cas des métaux de base et de l'or, les résidus issus de l'usine (appelée "la laverie") sont généralement constitués de particules finement broyées, de sables fins et limons issus du traitement du minerai par gravité ou flottation. Ils sont souvent resédimentés dans des bacs de décantation retenus par des digues à stériles (Fig. 1-F,G ; photo 3a) ou déposés en terril. Afin de réduire les coûts de transport, l'exploitant localisera la laverie en aval de la mine (transport par gravité) et les schlamms de laverie seront décantés dans le vallon sous-jacent, à l'amont d'une digue à stériles.

Les résidus et les boues issus d'une laverie contiennent fréquemment des teneurs significatives en éléments accompagnateurs ou en minéraux secondaires tels que les sulfures de fer (la pyrite, etc.) et leurs produits d'oxydation. Ils peuvent contenir aussi des concentrations résiduelles non négligeables en réactifs utilisés pour la séparation et la concentration des métaux valorisables.

1.2.4. Autres types de résidus

Dans bon nombre d'exploitations *anciennes* (Fe, Cu, Sn...), le minerai ou concentré était grillé ou fondu sur place pour éliminer certains composants (sulfures, par exemple) afin d'arriver à un produit marchand plus pur (fig. 1). Dans ces cas, on peut retrouver sur ces sites anciens des tas de scories qui forment un cas particulier de rejets. Des suies provenant du nettoyage des fours de grillage ou des conduits d'évacuation des fumées y sont fréquemment associées. Ces produits oxydés se retrouvent, soit accumulés à proximité de la mine si le grillage était opéré sur place, soit souvent entassés à proximité de la fonderie en contrebas.

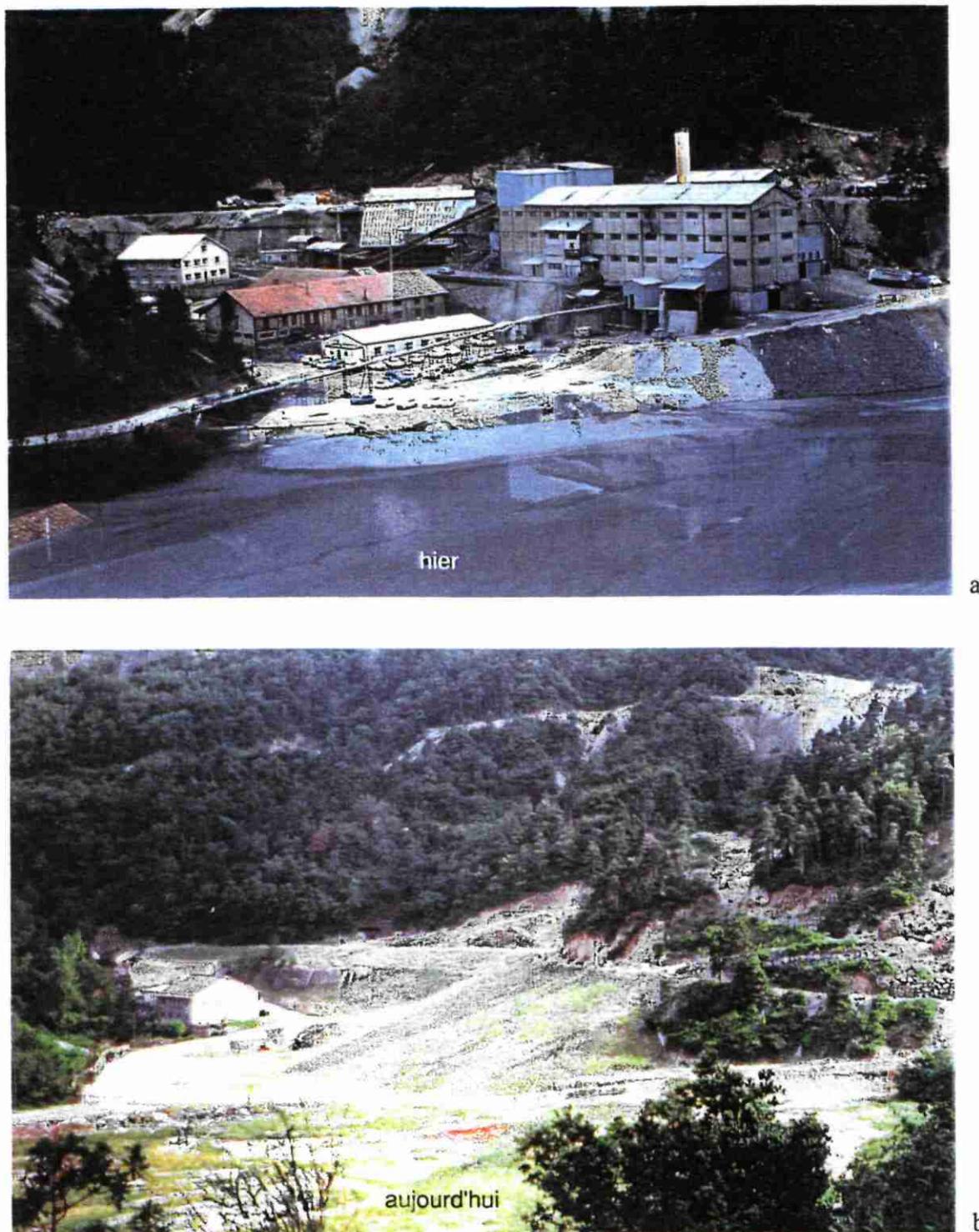


Fig. 3 - Exemples de stockage de résidus de traitement.

Les Malines Saint-Laurent-le-Minier ; avant (a) et après (b) la réhabilitation qui a été faite sur le site par le concessionnaire avant la renonciation*

* La mine qui a fermé en 1991 était une mine souterraine. La laverie (usine de concentration) avait la capacité de traiter journalièrement 1 200 t de minerai titrant entre 4 et 7 % de zinc et autour de 1 % de plomb. Sur les 20 dernières années, la production moyenne annuelle était de 260 000 t de tout-venant qui donnaient 23 000 t de concentré de zinc à une teneur moyenne de 55 % Zn, et 2 700 t de concentré de plomb à une teneur moyenne de 55 % Pb.

1.3. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX POTENTIELS

Certains des résidus ou déchets provenant de l'exploitation minière peuvent, de par la masse qu'ils représentent ou de par leur nature chimique (ou physique), porter atteinte à différents éléments de l'environnement, en particulier l'eau, les sols, le paysage, la végétation et l'homme. Comme nous aurons besoin de faire référence explicitement ou implicitement à ces impacts éventuels à tout stade de cette étude, il nous semble donc utile dès le début de ce rapport de citer ici brièvement les principaux *types d'impacts* que peuvent engendrer les résidus miniers, en commençant par un commentaire sur *la notion "relative" d'impact environnemental*.

1.3.1. La notion "relative" d'impact environnemental

Il importe d'attribuer aux différents impacts miniers une hiérarchie qui soit représentative de leur réelle importance, par comparaison aux impacts des autres activités industrielles, au point zéro naturel, à la durée de ces impacts et à leur évolution dans le temps, voire à leur prise en compte, dans les différentes phases de la vie de la mine, par des mesures préventives, curatives ou de confinement spécifiques. On doit ainsi distinguer le cas échéant l'impact non nuisible ou marquage, l'impact nuisible chimique ou pollution, et l'impact physique ou nuisance.

La notion d'impact environnemental ne prend tout son sens seulement si elle inclut un *changement* des paramètres environnementaux, suite à une activité minière. Ces paramètres, qui régissent la "qualité de l'environnement", peuvent avoir plusieurs composants : la composition chimique des eaux, sols, etc. ; la diversité biologique ; les qualités esthétiques visuelles ; etc. Pour être en mesure de juger *le degré d'impact*, il faut donc (i) que chaque composant soit exprimé en termes d'un paramètre quantifiable (pH, concentration d'un élément métallique, quantité de matières en suspension, mesure de diversité biologique, ...) et (ii) que la valeur mesurée puisse être comparée à *la gamme de valeurs "naturelles"* du paramètre pour l'environnement du site minier, c'est-à-dire à ceux qui auraient existé *avant les travaux miniers*.

En effet, toute enquête visant à déterminer l'impact réel d'une exploitation minière (pollution anthropique) aura besoin au préalable d'une connaissance aussi précise que possible de l'environnement naturel du site avant l'exploitation. Cela est particulièrement important dans le cas d'un impact environnemental dû à une éventuelle contamination par les éléments présents dans le minerai et/ou son encaissant car, comme évoqué dans le paragraphe 1.1.1, le site peut être situé dans un contexte d'*anomalie naturelle* exprimée en termes de concentrations "anormalement élevées" d'éléments divers dans les roches, les sols et les sédiments et/ou dans les eaux de surface et souterraines. Dans ce cas particulier, nous aurions besoin de prendre en compte le "*fond géochimique*" de l'environnement du site.

1.3.2. Les principaux facteurs déterminants

Comme le suggère la figure 4, la plupart des impacts qu'un résidu minier peut avoir sur l'environnement résultent d'une combinaison de l'éventuel mouvement dans l'espace de ses particules solides et de la potentielle capacité polluante de ses composants chimiques.

En effet, les caractéristiques physiques (distribution et taille des particules, stabilité géotechnique d'un terril, etc.) et la composition chimique (contenu en éléments toxiques, carence en substances essentielles pour la recolonisation végétale, etc.) d'un résidu, forcément très différentes de celles du système naturel sol/végétation du site, peuvent rendre le résidu plus susceptible soit de se déplacer dans l'environnement, soit d'agir comme source de contamination chimique de la chaîne biologique ou encore tout simplement, de ralentir sa réintégration dans la richesse écologique naturelle de l'environnement du site.

En ce qui concerne la mobilité, la figure 5 montre les principaux liens relationnels entre les diverses "origines" éventuelles de polluants présents sur un site minier (et les résidus solides en particulier) et les divers compartiments physiques et cibles biologiques de l'environnement qui peuvent éventuellement être atteints. En particulier, les particules constituant un résidu minier peuvent être déplacées dans l'environnement en tant que matières en suspension dans les cours d'eau suite à une érosion par les eaux de ruissellement ou en tant que poussières portées par le vent. La quantité de matériel déplacé, la vitesse d'érosion, l'étendue environnementale affectée dépendront à la fois des caractéristiques du résidu (tailles des particules, humidité, etc.) et du lieu de stockage (forme, positionnement dans un bassin versant, etc.) ainsi que de l'intensité des éléments climatiques auxquels ils sont soumis (pluies, vents, régime de température, etc.).

La finesse et l'homogénéité de la taille des particules des *résidus de l'usine de traitement* (cf. chapitre 3) les rendent particulièrement susceptibles à une dispersion dans l'environnement (dans le cas d'un lieu de stockage mal conçu et non réaménagé).

La *capacité polluante chimique* d'un résidu est déterminée par :

- la nature et forme chimique des éléments et composés "contaminants"^{**} présents dans le résidu, et pour chaque composé et/ou élément contaminant ;
- sa quantité totale ;
- sa réactivité ;
- et la nature et forme chimique des composés polluants produits.

^{**} Un composé "contaminant" est défini ici comme un composé ou *élément chimique* qui, *suite aux opérations minières*, (i) est susceptible d'avoir un impact *négatif et significatif*, direct ou indirect, sur un écosystème récepteur et (ii) est présent à une concentration *significativement élevée par rapport à la concentration naturelle des sols du site* (fond géochimique).

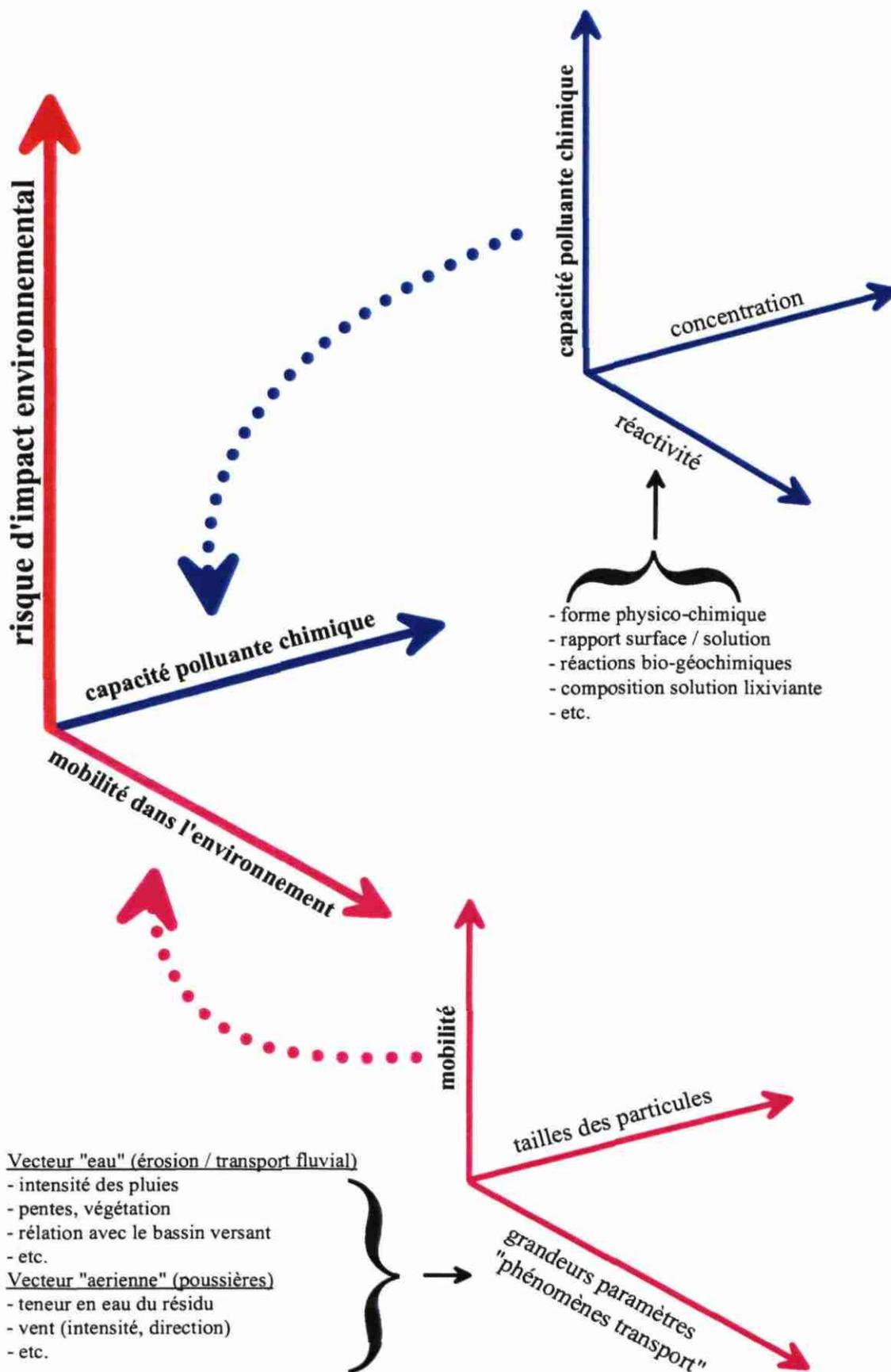


Fig. 4 - Facteurs déterminant le risque d'impact environnemental d'un résidu minier.

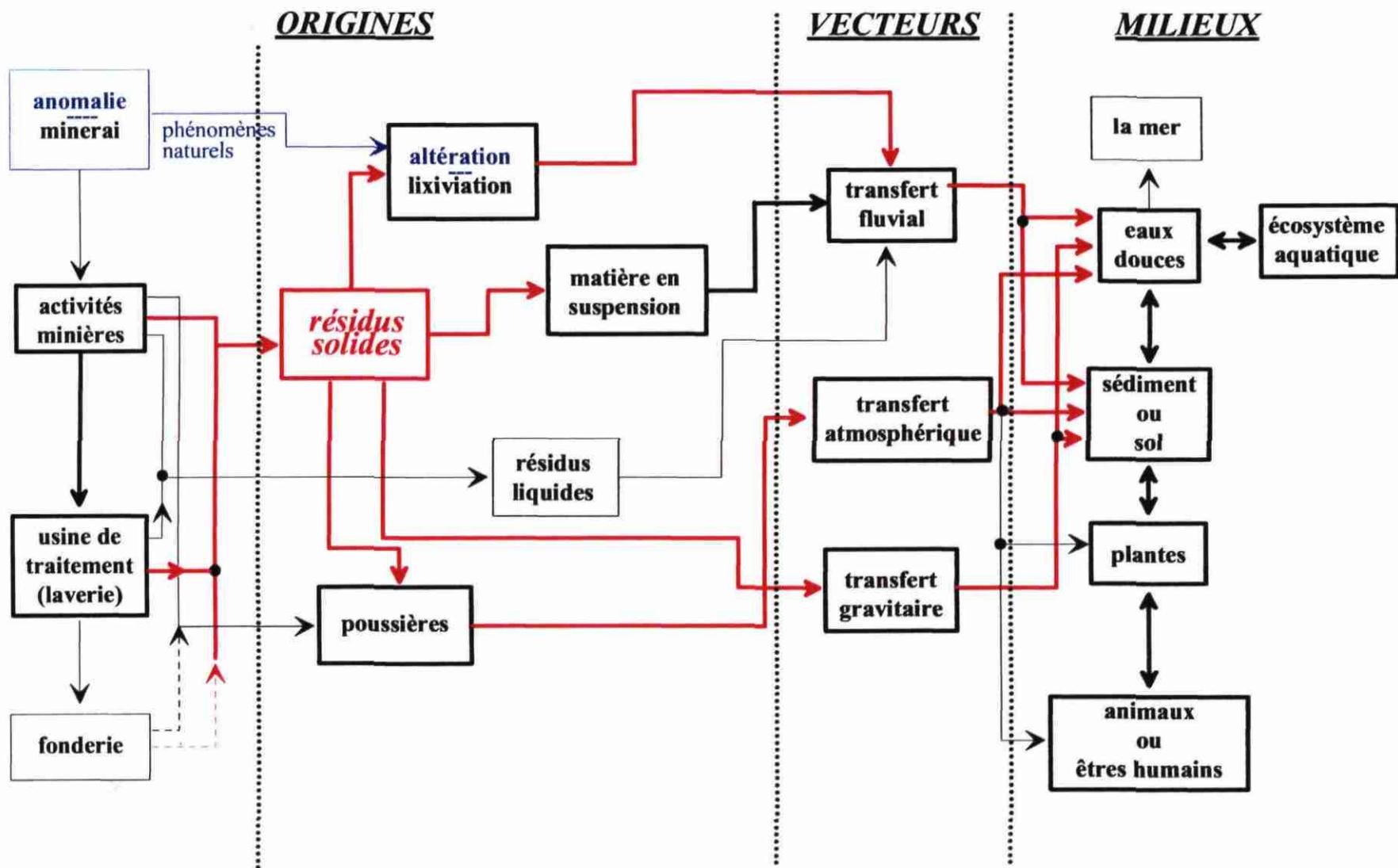


Fig. 5 - Voies de dispersion dans l'environnement de polluants provenant des résidus solides miniers.

Un contaminant peut être soit un élément ou phase minérale présent d'origine dans le minerai, soit un réactif chimique ajouté lors des filières d'enrichissement. Les composés contaminants dépendront donc de la **substance exploitée** et de la **nature minéralogique** du minerai. Dans le cas des phases minérales contaminantes, l'éventuel impact environnemental sera fonction des différences en ce qui concerne la quantité et la réactivité des phases minérales d'un résidu stocké dans l'environnement, par rapport à la composition et la réactivité des sols du site. Par exemple, les éventuelles *haldes de minerai pauvre* de certaines mines de métaux de base et d'or, et davantage encore les *résidus de l'usine de traitement (laverie)*, peuvent contenir des quantités de pyrite et de métaux lourds beaucoup plus élevées que dans le sol. En contact avec l'oxygène atmosphérique et soumis à la lixiviation par les eaux de pluie, ces résidus peuvent réagir chimiquement et biologiquement et ce, jusqu'à provoquer le "*drainage minier acide*" (cf. paragraphe 1.3.2).

La combinaison des deux facteurs, quantité et réactivité, détermineront en grande partie la quantité totale d'un composé contaminant qui sera transformée en forme soluble (et/ou biodisponible) par unité de temps. Il est important de rappeler que, pour un même élément "contaminant" (métal lourd, par exemple), la vitesse de solubilisation, sa "réactivité", peut varier énormément en fonction de la nature de la phase minérale porteuse (cas des minerais oxydés ou sulfurés des métaux de base). La vitesse de solubilisation peut aussi être fortement ralentie par la présence dans le minerai de certaines phases minérales (par exemple, l'effet d'un excès de phases carbonatées sur l'oxydation de pyrite : cf. paragraphe 1.3.4). En l'absence d'autres processus de transfert, ce taux de solubilisation, multiplié par le flux d'eau percolant à travers un résidu, contribuera largement à la détermination de la concentration dissoute du composé polluant dans les eaux sortant du résidu.

Il est important de signaler que la quantité totale, et souvent la réactivité, des composés et éléments contaminants d'un résidu diminuent naturellement avec le temps. "L'âge" d'un résidu, le temps depuis lequel il est sujet aux processus de solubilisation et de lixiviation, sera donc aussi un facteur important ; en général on peut s'attendre à ce que le taux de solubilisation des éventuels contaminants chimiques s'estompe progressivement avec le temps suite à l'épuisement de la masse de composants chimiques susceptibles d'être solubilisée et/ou à leur transformation en composés secondaires moins réactifs.

1.3.3. Les principaux types d'impact environnemental

Dans le cas d'un résidu ne possédant pas de réactivité chimique significative, les impacts environnementaux éventuels se limiteront surtout à ceux liés au transport hors site des matériaux constituant les résidus. Dans ce cas, les principaux impacts environnementaux *éventuels* des résidus miniers seront :

- suite à l'érosion par les eaux de ruissellement, d'être *une source de matières en suspension* (sédiments) entraînant ainsi une dégradation de la qualité des eaux et de la nature des fonds des cours d'eau en aval du site. Cela peut avoir des éventuels impacts

sur la flore et la faune naturelles et, donc, sur l'utilisation éventuelle de ces cours d'eau pour la pêche, la pisciculture, etc. ;

- d'être **une source de poussières volantes**, donc de nuisance pour les habitants et utilisateurs des espaces sujets aux éventuelles retombées aériennes ; les résidus de laverie peuvent être particulièrement sujets à ce type de transport hors site dû à la finesse des particules de ce genre de résidu ;
- sur les **qualités "esthétiques"** de l'environnement ; cela peut-être le cas, par exemple, pour tous les résidus à volume important (stériles de découverte, d'exploitation, de laverie) dont les lieux de stockage n'ont pas été réaménagés (terrassement, revégétation, etc.).

La nature et la gravité des éventuels impacts environnementaux du type "contamination chimique" et/ou "effet écotoxicologique" varieront selon qu'un résidu contienne ou non des composants chimiques capables :

- de changer de façon significative et adverse la composition chimique des ressources en eaux (de surface, souterraines) et/ou les sols et sédiments, et/ou
- d'avoir des effets négatifs sur la flore et la faune et la chaîne alimentaire.

Dans le cas de résidus ayant des composés chimiques potentiellement polluants, nous pouvons ajouter les impacts suivants à ceux cités auparavant :

- d'être **responsable d'une contamination chimique** des eaux de surface et/ou souterraines. Le "drainage minier acide" (cf. paragraphe 1.3.2), par exemple, peut être responsable de l'acidification d'un cours d'eau et des teneurs élevées en fer, sulfate et, éventuellement, en métaux lourds polluants.
- suite à l'érosion des résidus de laverie, d'être **responsable de rejets importants de matières solides contaminées** dans les sols des versants ou les alluvions. Ces résidus peuvent renfermer à la fois des quantités non négligeables en éléments accompagnateurs présents dans le minerai (métaux lourds, As, etc.) et, éventuellement, des quantités résiduelles significatives en réactifs chimiques ajoutés dans les filières de traitement.

2. La mine en France et la production de résidus miniers

Les quantités des différents types de résidus miniers et leurs caractères éventuellement polluants seront déterminés, à la base, par :

- la substance valorisable (et son contexte minéralogique et gîtologique) ;
- les caractéristiques du gisement (profondeur, nature, taille) ;
- l'époque de l'activité minière (contexte économique, traitement utilisé, âge des résidus).

Leur mode de répartition sur le territoire -une quantité ou dispersion plus ou moins grande- dépend du nombre et de la taille des sites miniers.

Dans ce chapitre, nous donnerons un bref aperçu de la mine en France sur cette base avec pour objectif principal de donner une première typologie des résidus miniers français en termes de (i) substance valorisée, (ii) historique de la production, (iii) quantités globales des résidus. Ces informations permettant d'avoir une première idée, par substance, des quantités de résidus qui existent en France, de leur dispersion sur le territoire (nombre de sites, tailles) et de leur âge. Comme évoqué dans l'avant-propos de ce rapport, nous porterons ici notre attention plus particulièrement sur les mines de métaux de base et d'or.

Tous ces paramètres ayant fortement évolué au cours de l'histoire, on tracera tout d'abord un panorama historique succinct de l'activité et des productions minières françaises, ensuite on fera un essai de quantification des sites miniers et enfin on abordera l'évaluation quantitative et la typologie des résidus de l'exploitation minière.

2.1. PANORAMA HISTORIQUE DE LA PRODUCTION MINIERE FRANCAISE

On ne peut classer la France métropolitaine parmi les grandes puissances minières comme l'Afrique du Sud ou l'Australie, mais par rapport à la superficie de son territoire, sa production a été très importante. En effet, la France qui a *une tradition minière très ancienne*, a joué, à certaines époques et pour certaines substances, un rôle primordial à l'échelle européenne voire mondiale. Elle a, par exemple, été le premier producteur mondial d'antimoine de 1890 à 1908, la mine de La Lucette (Mayenne), plus gros gisement mondial, produisant alors un quart du Sb mondial. Ses productions de charbon, fer, bauxite, potasse, uranium, arsenic, bismuth, tungstène, antimoine, talc, fluorine, la situaient -ou la situent encore dans quelques cas- parmi les dix premiers producteurs mondiaux de ces substances.

L'humanité a utilisé certains métaux dès avant le V^e millénaire avant J.C. En France, il faut attendre *l'époque celte*, à la fin du II^e millénaire avant J.C. pour retrouver des traces

importantes d'activité minière avec les "aurières" et "stannières" du Limousin et de Bretagne. Durant la période gallo-romaine, la production d'or a beaucoup baissé mais la mine s'est diversifiée : Pb, Ag dans les Pyrénées, en Provence et dans le Poitou, Fe dans le Sud, Cu dans le Centre et l'Est. On a ensuite assez peu d'informations sur l'industrie extractive au haut moyen-âge mais une relance apparaît dès le X^e siècle, notamment pour l'argent dans l'Est influencé par les mineurs aguerris de l'Europe Centrale, mais aussi dans les Alpes (L'Argentière-la-Bessée, Vallauria, Brandes) et le Poitou (Melle).

L'exploitation du charbon apparaît au XIII^e siècle à Saint-Etienne, mais la Renaissance, malgré le foisonnement des idées, ne paraît pas avoir sensiblement réactivé la mine française. La concurrence du Nouveau Monde, de l'Orient et de l'Afrique n'est sans doute pas étrangère à cette atonie jusqu'au XVIII^e siècle.

La révolution industrielle des XVIII^e et XIX^e siècles change tout. Les besoins énergétiques en matières premières s'accroissent considérablement ; les technologies évoluent et le progrès des connaissances entraîne une diversification des minéraux exploités. On peut retenir parmi les grandes dates :

- la découverte du bassin charbonnier du Nord-Pas-de-Calais en 1714 ;
- les progrès de la sidérurgie (procédés Bessemer en 1856 et Thomas en 1878) et le développement de la mine de fer en Lorraine ;
- la diversification minière au XIX^e siècle : lignite, bitumes, tungstène, antimoine, manganèse, zinc, pyrite, talc, phosphate, barytine, fluorine, etc. ;
- les découvertes de la bauxite (1885) et de l'électrometallurgie (1886) ;
- l'ouverture des mines de potasse d'Alsace (1910).

Mais jusqu'en 1939, à part le charbon et le fer, les tonnages extraits demeurent modestes au regard des standards de 1995.

A partir de la seconde guerre mondiale, les évolutions s'accroissent pour des raisons économiques (marché), politiques (indépendance puis mondialisation) et techniques (mécanisation et transports). On peut très schématiquement distinguer deux périodes :

- 1945-1975 : les "**trente glorieuses**" marquées par l'effort pour diminuer la dépendance énergétique nationale : production intensive de charbon, découvertes de pétrole et gaz, développement de l'industrie de l'uranium, le développement de nouvelles mines : Largentière (Pb-Zn-Ag), Saint-Salvy (Zn-Cd-Ge), Salau (W), Chaillac (barytine) entre autres ; et une stratégie conquérante des groupes miniers français ;
- 1975-1995 : **le déclin** avec la diminution ou l'arrêt des grosses productions (charbon, gaz, fer, bauxite, potasse...), la fermeture de nombreuses mines métalliques et la reconversion partielle des groupes vers les minéraux industriels (talc, andalousite, feldspaths...) et l'or, seul métal en progression récente.

Ces évolutions sont illustrées par les courbes de production de bauxite (Al), de fluorine, de barytine (Fig. 6a, b), des métaux de base (Zn, Pb) et de l'or données (figures 7a, b).

Le détail chiffré des productions minières métropolitaines cumulées et annuelles récentes se trouve dans le tableau 1.

Les résidus miniers actuels sont le résultat de cette longue histoire et des évolutions de l'art des mines et du traitement des minerais. Chaque site minier, ancien ou actuel, a donc ses propres caractéristiques et sa propre histoire, souvent complexe. En première approximation, on peut retenir de cette évolution les lignes générales suivantes :

- **les sites miniers antérieurs au XVIII^e siècle** relevant surtout de l'archéologie ou les impacts environnementaux sont *a priori* négligeables : les travaux, peu profonds, sont comblés ou stabilisés ; les résidus -quand ils n'ont pas été réutilisés- sont peu volumineux et devraient être en équilibre physique et chimique avec leur milieu ;
- **à partir du XIX^e siècle**, les évolutions se font suivant plusieurs axes :
 - . augmentation considérable des **quantités de minerai extraites**. La production annuelle française de minerai de fer, par exemple, est passée de 3 Mt en 1900 à 48 Mt en 1930 et, après le creux de la seconde guerre mondiale, a culminé à 66 Mt en 1960 (cf. la production annuelle de bauxite, fig. 7a). Le développement assez récent des exploitations à ciel ouvert (charbon, fluorine, or, barytine, etc.) a par ailleurs nettement augmenté les volumes de stérile déplacé ;
 - . **baisse des teneurs en élément valorisable** des minerais exploités. Cette tendance, très nette à l'échelle mondiale, a eu un impact atténué au niveau français du fait des types de gisements français (absence entre autres de cuivre porphyrique ou d'or épithermal). Elle a eu néanmoins une incidence sur la quantité des résidus de traitement ;
 - . **augmentation** très nette, grâce à la mécanisation et au développement des transports, **de la taille moyenne des sites miniers** et parallèlement **réduction du nombre de mines métalliques**. Au cours du dernier siècle, on a ainsi pu passer dans une région donnée, par exemple pour le Pb-Zn, du district filonien -5 à 20 filons ayant produit chacun quelques kilotonnes à quelques dizaines de kilotonnes métal- à une seule mine produisant quelques centaines de kilotonnes métal ;
 - . **sensibilisation accrue** (dans les deux dernières décennies) **des producteurs aux problèmes de l'environnement**, des moyens mécaniques améliorés permettant par ailleurs un meilleur stockage des divers résidus.

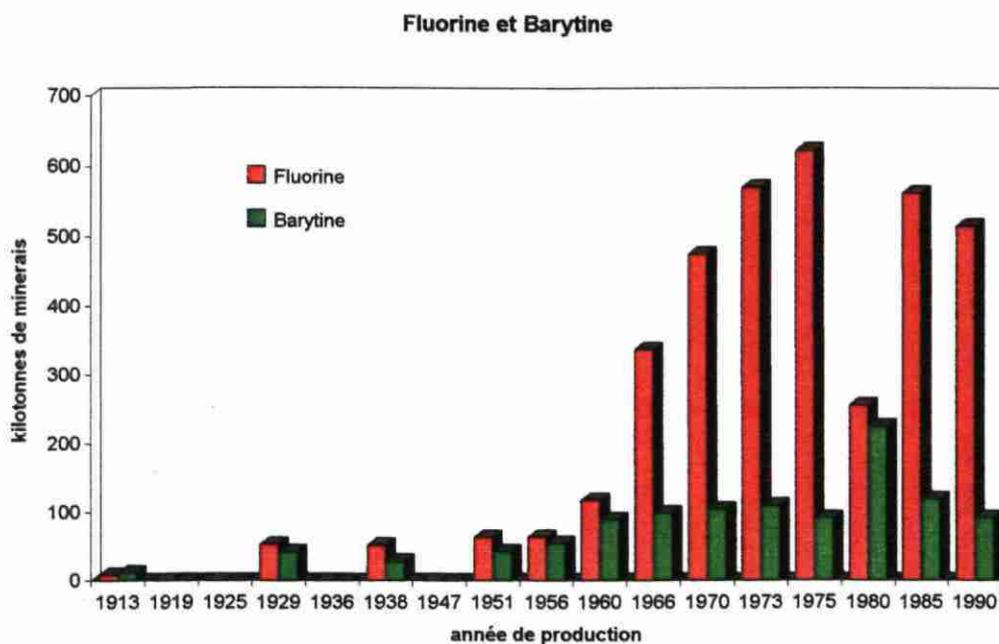
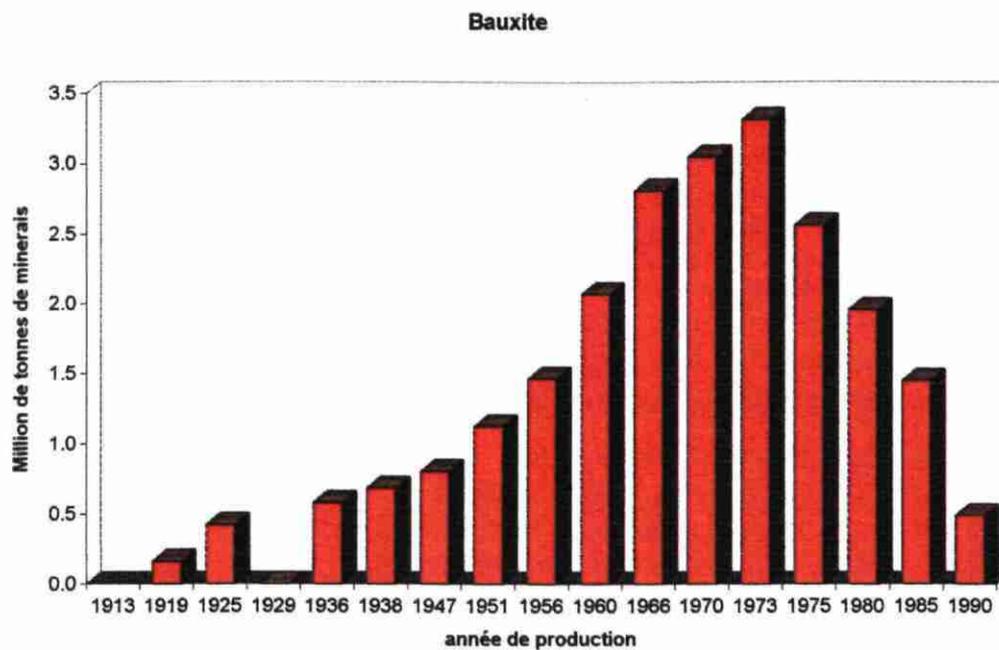
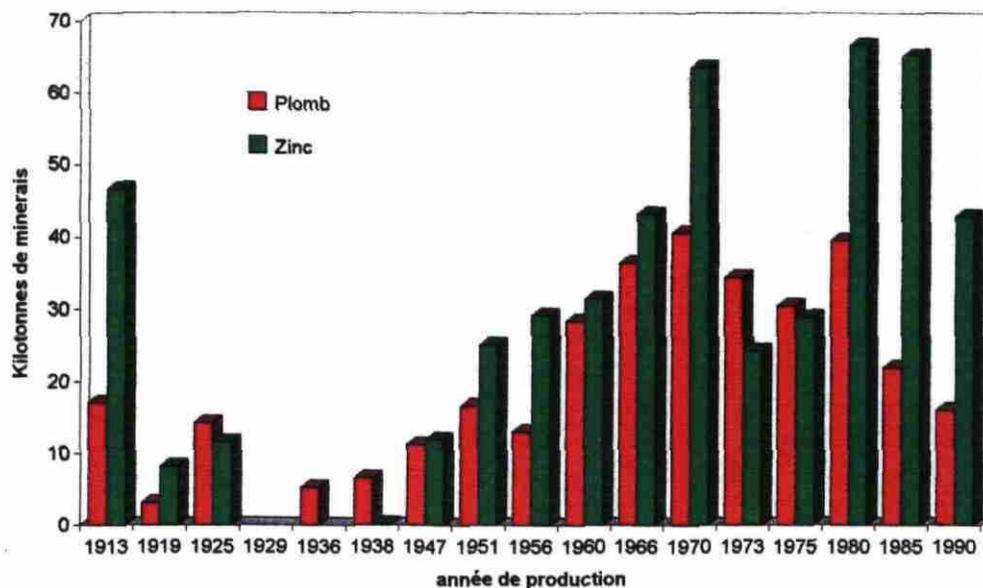


Fig. 6 - Production française de a) bauxite, (b) fluorine et barytine.

Plomb et Zinc



Or

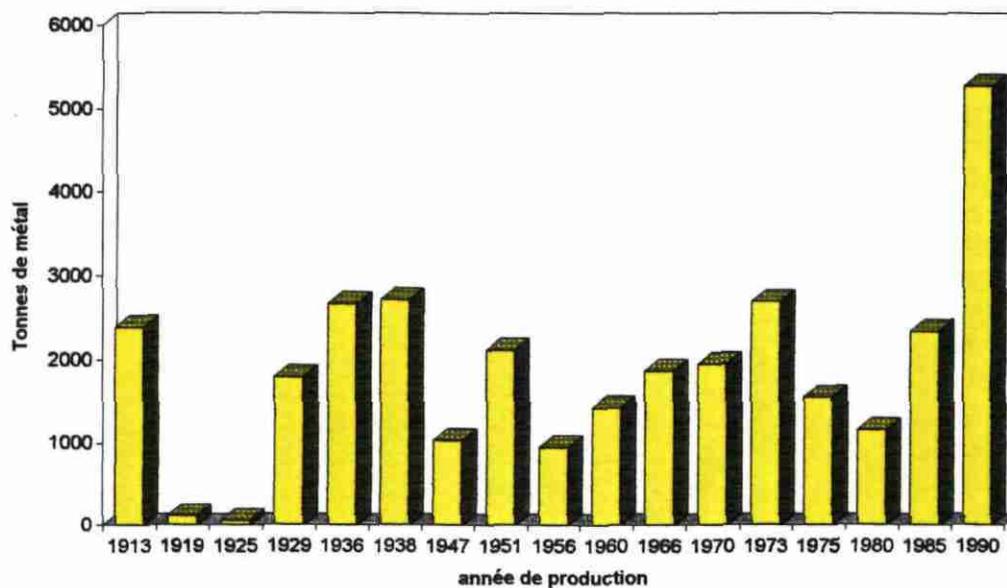


Fig. 7 - Production française de a) plomb et zinc, b) d'or.

Les résidus miniers français

Substances	Unités	Production cumulée estimée au 1/1/1994		Année record		Production 1994
		Production estimée	Période	Production	Année	
<i>Minerais métalliques</i>						
Fer	Mt de minerai	4000e	1750 - 1993	66,9	1960	2,4
Pyrite	Mt de pyrite	29,6	1850 - 1972			-
Aluminium	Mt de bauxite	101	1885 - 1991	3,4	1972	0,2
Manganèse	kt de minerai	875	1830 - 1949	38,9	1898	-
Cuivre	kt de métal contenu	70	- 1988	1,6	1988	-
Plomb	"	1800	1800 - 1991	32,5	1978	-
Zinc	"	2350	1837 - 1993	42,0	1977	-
Antimoine	"	130	1860 - 1991	50	1908	-
Arsenic	kt métal produit	300	- 1984	5,9	1982	-
Bismuth	kt "	1,7	1950 - 1980	0,1	1976	-
Etain	t métal contenu	11800	1813 - 1986	453	1970	-
Tungstène	t WO ₃ contenu	26600	1812 - 1986	1409	1986	-
Germanium	t métal contenu	400	1975 - 1993			-
Cadmium	"	1600	- 1993	139	1993	-
Argent	"	5000	1800 - 1993	93,4	1977	2,86
Or	kg métal contenu	156600	1900 - 1993	5269	1990	5099
<i>Matériaux industriels</i>						
Fluorine	kt de CaF ₂ contenu	10300	1861 - 1993	370	1972	130
Barytine	kt de BaSO ₄ contenu	6000	1896 - 1993	236,5	1980	72
Phosphate	kt de P ₂ O ₅ contenu	3600	1860 - 1983	50	1899	-
Brome	kt de brome	160	1926 - 1993	5,9	1985	2,2
Talc	kt de produit marchand	13000	1840 - 1993	3505	1992	306
Amiante	kt de fibres	300	1920 - 1978	27	1965	-
Diatomite	kt produit marchand	7000	1950 - 1993	270	1985	85
Andalousite	"	900	1971 - 1993	70	1991	55
Kaolin	"		- 1993			327
Argiles nobles	"		- 1993	1450	1981	1095
Micas	"		- 1993			10e
Feldspath	"	6110	1971 - 1993	484	1991	396
Silice	"		- 1993			6206
Dolomies	"		- 1993			?
Calcaires	"		- 1993			
Ocre	"	2500				

Tabl. 1 - Productions et ressources métropolitaines.

2.2. LES SITES MINIERES FRANCAIS

Comme suggéré ci-dessus, la notion de site minier ou de mine a, pour des raisons techniques et économiques, grandement varié dans le temps. Suivant la taille considérée dans cette étude, le nombre de sites concernés peut donc varier d'une manière considérable et les quelques chiffres et données ci-dessous illustrent ce propos.

Deux cartes minières à 1/1 000 000, réalisées à 120 ans de distance, permettent de mesurer l'évolution des activités minières en France : la Carte Minière de France réalisée par A. Caillaux en 1875 et celle de 1994 réalisée par une équipe du BRGM (Béziat *et al.*, 1995). De nombreuses petites mines exploitées ou récemment abandonnées en 1875 ne sont plus signalées en 1994. Des districts entiers ont disparu, comme les bassins ferrifères du Jura et ceux d'Aquitaine, le district à Pb-Zn autour de Foix, etc. La distribution des mines métalliques (autres que le fer) a peu évolué puisque 90 % d'entre elles se situent dans ou sur le pourtour immédiat du "bâti hercynien" et dans l'alpin. De nouvelles substances sont apparues : uranium, kaolin, hydrocarbures du Bassin parisien et gaz en Aquitaine.

La carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000 (1979-1986) permet de donner des premiers ordres de grandeur. Elle regroupe environ 4 000 sites minéralisés allant de l'indice minéralisé insignifiant à la mine de taille mondiale. Parmi ceux-ci, environ 1 400 sont signalés comme ayant produit du minerai, souvent en quantité très faible puisque seulement 400 sites sont classés comme ayant une production économique notable (à titre indicatif, plus d'une tonne d'or ou de 5 Mt de minerai de fer).

Une enquête parallèle, par substance et à caractère économique, a été réalisée par le BRGM entre 1978 et 1984, dans le cadre de l'Inventaire Minier de la France, et en partie réactualisée en 1991-92. Pour l'ensemble des sites miniers -en dehors de ceux exclus de l'étude présente et de quelques minéraux industriels non traités- on comptabilise un total de 573 mines ou carrières : 37 % concernent la barytine, 13 % la fluorine et 10 % le Pb-Zn. L'antimoine, le cuivre et le manganèse représentent chacun 5 à 6 % du total, mais ne représentent pour chaque site que des quantités exploitées très faibles (tabl. 1).

Par contre, si l'on prend en compte seulement les mines de tailles significatives (taille 1 à 3 de la carte de 1994) signalées dans chaque district (charbon, uranium, potasse, sel et hydrocarbures exclus), on dénombre 171 sites miniers récents. Par substance, ils se répartissent comme suit:

Substance	nombre de sites miniers
Fe	73 mines
Pb-Zn	26 mines
F-Ba	26 mines
Sb	16 mines
Kaolin-feldsp.	10 mines
Au	8 mines
Sn, W	8 mines
Al	4 mines

Ces derniers chiffres sont en partie sous-évalués, car une unité correspond parfois à un district avec plusieurs mines (Al par exemple) et certains minéraux industriels tels qu'andalousite, talc, diatomite, ne sont pas inclus.

La carte (fig. 8), extraite d'un article du numéro 521 de la Chronique de la recherche minière, dénombre *120 principaux sites d'extraction en 1994*. Avec les mines de moindre taille, ce nombre peut être porté à 200 environ, mais ils concernent les combustibles minéraux, les minerais métalliques et les minéraux industriels. Hors hydrocarbures, charbon, uranium, potasse et sel, leur nombre n'est plus que de 80 (et sans doute inférieur à 150 en y incluant les petites mines), et la grande majorité d'entre eux concernent des matériaux industriels. En 1994, l'exploitation minière "métallique" est réduite à quelques substances (or, fer, uranium, auxquels on peut ajouter fluorine et barytine) à une douzaine de sites.

2.3. ESTIMATION DES QUANTITES DE RESIDUS MINIERES

Réaliser une estimation précise du volume des résidus miniers français est possible mais nécessite un inventaire complet site par site, travail trop important qui dépasse l'objectif de ce premier bilan. En effet, pour connaître précisément le volume des résidus miniers, il faut consulter les archives des mines (lorsqu'elles existent encore...), évaluer les productions, les méthodes de traitement et mesurer les quantités réelles de résidus laissées sur le site, en sachant qu'une partie de ceux-ci a pu être réutilisée comme minerai à basse teneur ou comme matériau de remblai ou d'empierrement. Souvent, l'érosion naturelle a déplacé une partie des résidus, surtout lorsque ceux-ci sont stockés en bordure de cours d'eau (cas fréquent en zone de relief accidenté).

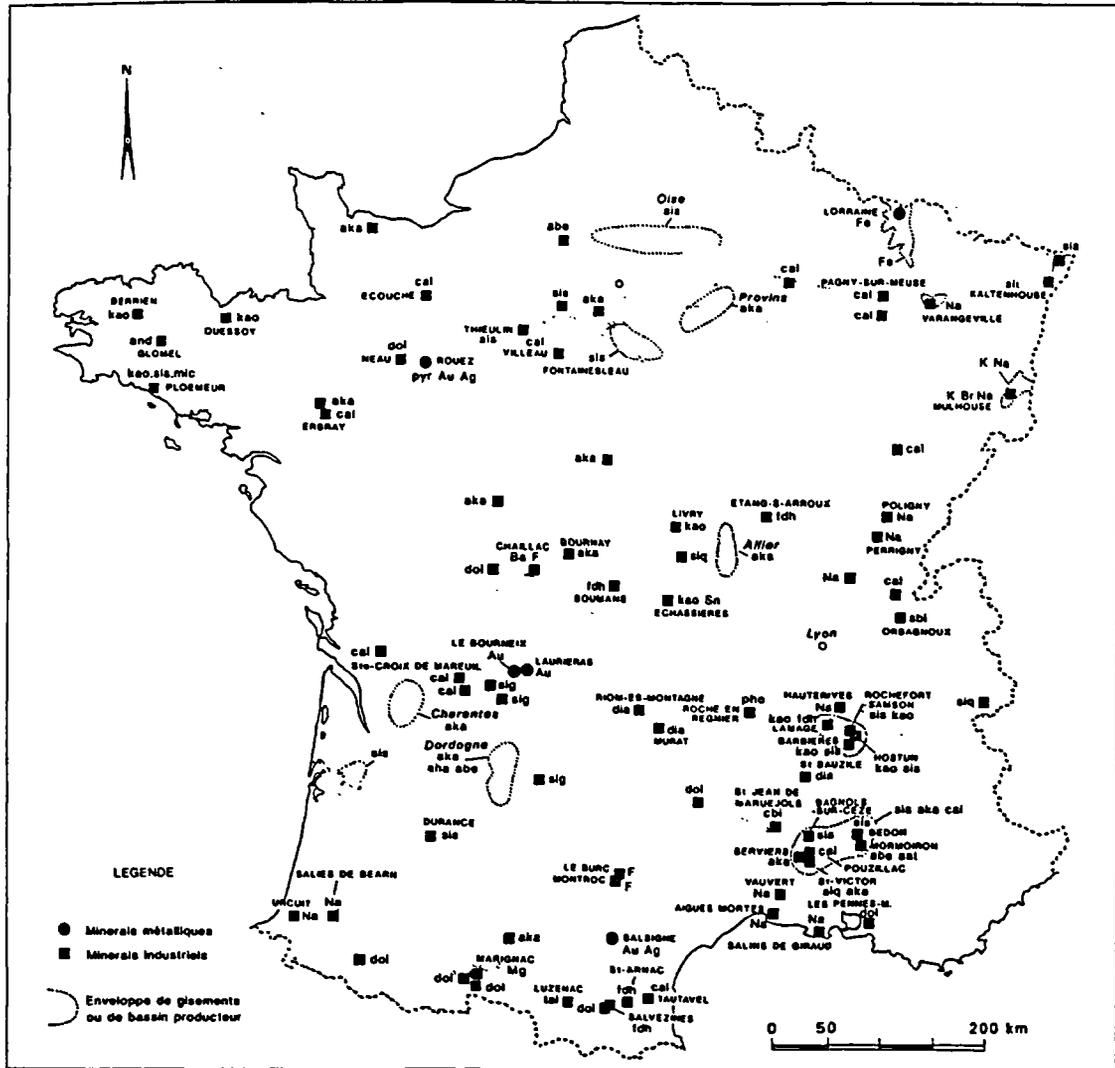


Fig. 8 - L'activité minière en 1994. Carte des principaux centres d'extraction. Symboles utilisés (substances traitées dans cette étude) : (Au), argent (Ag), fer (Fe), pyrite (pyr.), étain (Sn) ; minéraux industriels : fluorine (F), barytine (Ba), brome (Br), andalousite (and), talc (tal.), diatomite (dia.), kaolin (kao), micas (mic), quartz et quartzites (siq.).

Pour cette évaluation préliminaire, destinée à donner une image d'ensemble des volumes en jeu, deux approches ont été combinées :

- une évaluation globale et semi-quantitative fondée sur les quantités de minerais produites par les mines importantes et connues assez précisément. Connaissant les ratios de teneurs stériles-minerais et le rapport entre les minerais tout-venant et le concentré marchand, il est possible de recalculer un poids ou un volume théorique des résidus émis pendant la durée de vie de l'exploitation ;
- l'utilisation statistique d'un inventaire des résidus observés sur plus de 200 sites du Nord du Massif central à l'occasion d'une enquête détaillée réalisée en 1984 pour le Ministère de l'Environnement. Cette enquête permet d'obtenir une estimation plus réaliste des volumes à l'échelon national.

2.3.1. Approche globale et théorique

Cette évaluation est établie à partir des tableaux 2 et 3 sur les mines françaises de minerais métalliques -hors uranium- et de minéraux industriels -hors potasse- respectivement. Ces tableaux très synthétiques nécessitent, pour une meilleure lecture, les commentaires suivants.

Substances : Les gisements polymétalliques (tels que Zn-Pb-Cu ou Cu-pyrite) ont été classés selon leur production dominante. Il n'est par ailleurs pas possible, dans le cadre de cette étude, de distinguer les divers types de gisements selon leur morphologie, leur minéralogie, leur encaissant etc., facteurs éventuellement importants en ce qui concerne les quantités et la nature des résidus produits.

Tailles limites : La taille limite inférieure choisie est une coupure artificielle, souvent définie en métal contenu, mais qui permet de ne prendre en compte que les mines significatives, tout en donnant une bonne idée générale de l'activité minière française. La limite supérieure donne une bonne approximation des plus gros gisements français connus à ce jour. Pour un examen mieux adapté aux contraintes environnementales, ces limites devront être revues dans une seconde phase, notamment en fonction de la toxicité possible du minerai et du traitement (exemple : cyanuration pour l'or ou présence possible d'arsenic dans certaines mines).

Nombre de mines : Les chiffres dans cette colonne sont bien évidemment déterminés par la taille limite inférieure considérée. Dans certains cas (pyrite par exemple) le nombre de mines -toutes tailles confondues- ne sera pas beaucoup plus grand. Par contre, pour certaines substances, le nombre total de mines ayant eu une production "notable" est beaucoup plus grand. Pour le plomb-zinc par exemple, environ 130 mines ont produit au moins 4,2 kilotonnes métal, soit théoriquement 24 à 80 kt de résidus miniers. Mais la plupart d'entre elles sont des filons anciennement exploités et pour lesquels on peut considérer que les processus naturels d'oxydation a bloqué l'évolution chimique des résidus. Il a donc paru plus approprié, dans cette étape préliminaire, de se limiter aux mines significatives pour donner une idée réaliste du nombre de sites à impact environnemental potentiel. Pour les minéraux industriels, il s'agit des mines actuelles.

Travaux après 1945 : On a décompté dans cette colonne les travaux miniers importants effectués dans cette période et ayant donné lieu à exploitation (mines) ou non (projets). Les mines actives en 1994 sont peu nombreuses dans le secteur métallique, mais beaucoup plus abondantes pour les minéraux industriels. Les nombres de mines abandonnées après 1945 -donc assez récentes- sont approximatifs pour les mines métalliques et inconnus pour les minéraux industriels, dont les sites d'extraction anciens sont beaucoup moins bien répertoriés dans les documents synthétiques consultés.

SUBSTANCES	NOMBRE DE MINES		TRAVAUX APRES 1945		PRODUCTIONS METROPOLITAINES CUMULEES	FOURCHETTES DE TENEURS	PRINCIPALES MINES ACTIVES OU RECENTES
	Tailles limites	Nombre de Mines	Abandonnée	Actives en 1994	Métal ou minéral produit	approximative	entre parenthèses : grosses mines anciennes ou projets
Pb - Zn (Ag, Ge, ...)	20 à 2 000 kt de métal contenu (100 kt à 20 Mt minéral)	30	26	-	1 800 kt Pb 2 350 kt Zn (Ag sous produit)	5 - 15% Pb + Zn	Les Malines, Saint-Salvy, Largentière, Pierrefitte, La Plagne (Chessey)
Pyrite (+ MB)	0,5 à 100 Mt minéral	4	3	-	29,6 Mt pyrite	25 - 50% S	Sain-Bel, Chizeuil, Le Soulier (Rouez)
Cu	2 à 150 kt métal cont. (50 kt à 5 Mt minéral)	6	3	-	70 kt Cu	1 - 4% Cu	(Chessey)
Au (Ag)	0,5 à 150 t métal contenu (50 kt à 15 Mt minéral)	14	5 ?	4	161 tonnes Au	5 - 25 g/t	Salsigne, le Bourneix, Rouez, Le Chatelet, La Bellière
W - Sn	1 à 43 kt métal contenu (10 kt à 5 Mt minéral)	12	9 ?	-	11,8 kt Sn 26,6 kt WO ₃ contenu	0,3 - 1,5% WO ₃ 0,1 - 0,75% Sn	Safau, Enguiales, Leucamp, La Favière-les-Montmins Saint-Renan, Abbaretz, Echassières
Fe	1 à > 1 000 Mt de minéral	17	nbx	1 ?	env. 4 000 Mt de minéral	35 - 70% Fe	Bassin lorrain (Longwy, Nancy) Soumont, Segre
Al (Ga)	0,5 à # 50 Mt bauxite contenue	21 (zones)	15?	0 ?	101 Mt bauxite	30 à 60% Al ₂ O ₃	Exploitations actives pour cimenteries et réfractaires (mais pas Al) Provence s.l. : Brignoles, Villeveyrac, Les Baux, etc...
Mn	0,1 à 1 Mt minéral	3	-	-	875 kt minéral	-	(Romanèches)
Sb	2 à 42 kt métal contenu (20 kt à 5 Mt minéral)	13	7 ?	-	130 kt Sb	1,5 à 10% Sb	(La Lucette) Rochetrejoux, Quimper, district Brioude- Massiac

Tabl. 2 - Les mines métalliques - approche quantitative.

SUBSTANCES	NOMBRE DE MINES		TRAVAUX APRES 1945		PRODUCTIONS METROPOLITAINES CUMULEES	FOURCHETTES DE TENEURS	PRINCIPALES MINES ACTIVES OU RECENTES
	Tailles limites	Nombre de Mines	Abandonnée	Actives	Métal produit		
Fluorine	100 à 2 000 kt de F ₂ Ca contenue 200 kt à 6 Mt de mineral	19	15 (+22 petits)	3 (ou 4)	10,4 Mt de F ₂ Ca	30 à 60 % CaF ₂	Montroc-le-Moulinai, Le Burc, Le Rossignol (Chaillac) Escaro Fontsaute, Langeac
Barytine	200 kt à 6 Mt de mineral 100 à 3 000 kt de BaSO ₄ contenue	14	13 (+19 petits)	1	6,5 Mt de BaSO ₄	30 à 70 % BaSO ₄	Chaillac, Les Porres, Pessens, Lacan
Phosphates	petites mines sauf craie phosphatée de Picardie	2	?	-	3,6 Mt de P ₂ O ₅	qqs à 10 % P ₂ O ₅	Hallencourt, Nurlu
Magnésite	(p.m.)	-	-	-	-	42 % MgO	- (Montner)
Talc	50 kt à 15 Mt de talc	-	1 (+ 4 petits)	-	--	10-90% de talc mais pas de signifi-cation (carrière)	--
Amlante	10 à 600 kt de fibres	3	3	-	300 kt de fibres	1 à 5% de fibres	Canari, Olmeta (cap Corse)
Kaolin (+ micas)	3 à 100 kt/an	9	?	9	?	?	Quessoy, Kerrien, Ploemeur, Echassières
(+ argiles "nobles")	10 à 500 kt/an	13	?	13	?	?	districts Provins, Indre, Charentes, Périgord
Andalousite	60 kt/an (prod.march.)	1	-	1	1 Mt prod. marchand.	env. 15% andalousite	Glome!
Diatomite	50 - 100 kt/an prod.march.	3	?	3	?		Saint-Bauzile, Murat, Riom-es-Montagne
Feldspaths	20 - 150 kt/an	6	?	6	6,5 Mt prod. march.		Morvan, Soumans, Salvezines, Saint-Arnac
Silice	10 kt à 1 Mt/an	23	?	23	?		Picardie, Fontainebleau, Vaucluse, Durance (Lot-et-Garonne)
Carbonates charges (calc + dolomites)	50 à 900 kt/an	29	?	29	?		Omev Tautavel, Précv Villeau, Pagny, Orqon, Ecouché Neau, Thèbe

Tabl. 3 - Les minéraux industriels - approche quantitative.

Production métropolitaine cumulée de métal, minerai ou produit marchand : Ces chiffres proviennent d'une réactualisation au 01/01/1995 de la notice de la carte minière métropolitaine à 1/1 000 000 éditée par le BRGM en 1995. L'incertitude est assez importante pour certains minéraux industriels.

A partir de ces tableaux, un calcul *très théorique* permet d'estimer très *approximativement* le volume global cumulé des *résidus de traitement* produits par les exploitations minières en France, c'est-à-dire à l'exclusion des résidus produits par la découverte ou les travaux miniers souterrains "au stérile", et des minéralisations non économiques rejetées avec les haldes ou stockées pour une éventuelle valorisation ultérieure.

Par exemple 100 kt de Pb produits à partir d'un minerai à 10 % Pb représentent environ 1 Mt de résidus de traitement : sur la base d'une récupération Pb de 87 % et de la production d'un concentré à 67 % Pb, environ 1 150 kt de minerai ont été exploitées et 150 kt de concentré produites.

Les chiffres globaux, ainsi calculés, donnent les estimations présentées tableau 4 ; dont :

- 130 Mt environ pour les résidus de métaux *non ferreux* (sauf l'aluminium), mais y compris la barytine et la fluorine ;
- pour le fer, l'estimation est quasi-impossible par cette méthode. Ils pourraient représenter un volume voisin de celui du minerai envoyé en fonderie, soit 4 milliards de tonnes, mais ils ont été en grande partie réutilisés pour le remblayage des mines ;
- pour les minéraux industriels (autres que Ba et F) et la bauxite, aucun chiffre ne peut être avancé. L'impact polluant des résidus est souvent faible, mais les nuisances liées aux exploitations à ciel ouvert (grosses quantités de stériles) peuvent être importantes.

Ces chiffres théoriques sont très *approchés* pour diverses raisons :

- concernant les mines anciennes, les données sur les pratiques alors en vigueur (scheidage au fond, etc.) sont fragmentaires ;
- dans certaines mines récentes, des mesures de protection et de réaménagement des sites ont été prises (Largentière, par exemple), qui éliminent l'impact de ces volumes ;
- les résidus miniers de toute nature, y compris les résidus de traitement, ont parfois été utilisés pour stabiliser les travaux en cours (backfilling), voire exploités comme granulats de voirie ou pour en extraire le contenu métallique résiduel (cas récents par exemple de Rouez -lixiviation du minerai pauvre-).

2.3.2. L'approche de terrain

Une étude récente permet néanmoins d'établir *un rapport statistique entre résidus théoriques et déchets réels*. Cette enquête régionale a été réalisée en 1984 (Rougeaud *et al.*, 1984) portant sur 229 sites de travaux miniers situés dans la moitié nord du Massif central et dont la moitié environ a donné lieu à une exploitation notable de diverses substances (Pb, Zn, Sb, W, Au, Cu, F, Ba, pyrite). Cette étude, qui repose sur un panel

assez représentatif de l'activité minière française, a permis de recenser 103 sites où le volume de résidus dépasse 500 m³, dont 11 supérieurs à 100 000 m³. Le volume total de résidus répertoriés sur une surface de 87 000 km² est de 5,1 Mm³ dont :

3,2 Mm³ pour les sables et limons de laverie (62 % du total, figure 9b),
 1,7 Mm³ pour les déblais ; stériles francs et/ou minéralisés (33 %),
 ~100 000 m³ (2 %) pour les argiles de décantation et
 ~120 000 m³ (2,5 %) pour les scories.

SUBSTANCES	PRODUCTIONS CUMULEES Métal ou minerai	TENEURS (moyenne pour calcul)	RESIDUS GLOBAUX
Pb - Zn (+ sous-produits)	1 800 kt Pb 2 350 kt Zn	5 à 15 % Pb + Zn (10 %)	45 Mt
Pyrite	29,6 Mt pyrite	50 % à 70 % FeS ₂ (60%)	10 Mt
Cu	70 kt Cu	1 - 3 % Cu (1,5 %)	5 Mt
Au	161 t Au	qqg g/t - 15 g/t (8 g/t)	20 Mt
W	26,6 Kt de WO ₃	0,3 - 1,5 % WO ₃ (1 %)	2,5 Mt
Sn	11,8 kt de Sn	0,1 - 1,5 % Sn	2 Mt
Sb	130 kt de Sb	(2,5 % ?)	5 Mt
Fluorine	10,4 Mt de F ₂ Ca	30 à 60 % F ₂ Ca (40 %)	25 Mt
Barytine	6,5 Mt de BaSO ₄	30 à 70 % BaSO ₄ (40 %)	15 Mt
		TOTAL	130 Mt

Tabl. 4 - Evaluation théorique des résidus de traitement de la mine métallique.

Ce volume total d'environ 5 Mm³ pour 103 sites répertoriés reste faible si on le compare aux résidus d'une grosse mine de Pb-Zn récente (Largentière) qui dépassent 10 Mm³ (à noter que dans le cas de cette mine, la plupart des résidus ont été utilisés pour le remblayage et réaménagement du site lors de sa fermeture). Plus de la moitié de ces sites ont produit moins de 10 000 m³ de résidus (fig. 9a).

Au total, les résidus sur ces 229 sites représentent 3,4 Mm³ de résidus de traitement et 1,7 Mt de déblais non traités (stériles francs et minéralisations non économiques). On peut admettre une densité de 1,5 pour ces matériaux foisonnés. Il y aurait donc environ 5 Mt de résidus de traitement constatés pour un tonnage calculé de résidus théoriques de 7,4 Mt. Sur la base de ce rapport statistique entre résidus théoriques et résidus réels (68 %), *la quantité globale en France des résidus de traitement de la mine métallique (métaux non ferreux sauf Al, plus Ba et F) serait approximativement de 90 Mt.*

On obtient ainsi une évaluation approximative, mais probablement assez réaliste, de la quantité globale des résidus de traitement : 90 à 130 Mt.

2.4. VUE RAPPROCHEE : DEUX EXEMPLES DE SITES MINIERES A RESIDUS

Afin de donner une vision plus "intime" à la fois de la nature des résidus qui peuvent être rencontrés sur les sites d'anciennes mines métalliques et des contextes miniers et environnementaux, nous présentons ci-après de brèves descriptions de deux sites miniers assez "typiques".

SITE "Ouche" (Auvergne)

Substance exploitée : Sb

Situation actuelle : site non actif, abandonné, non réaménagé.

Cadre géologique et gîtologique

Cinq filons de quartz minéralisés en stibine ; Teneurs Sb de 3 à 18 %.

Minéralisation accessoire : mispickel, barytine, dolomie, pyrite.

Mode d'exploitation

Mine souterraine: puits, galeries, cheminées.

Dépilage avec abandon de cavités souterraines résiduelles.

Traitement du minerai

Laverie sur le site de la mine (flottation) ; produits titrant 50/55 % de Sb. La laverie aurait aussi traité du minerai provenant de plusieurs autres exploitations. Produits chimiques utilisés : nitrate de plomb, huile phénolique, éthyl-xanthate de potassium.

Production

Environ 8 500 tonnes de Sb métal, de 1826 à 1957.

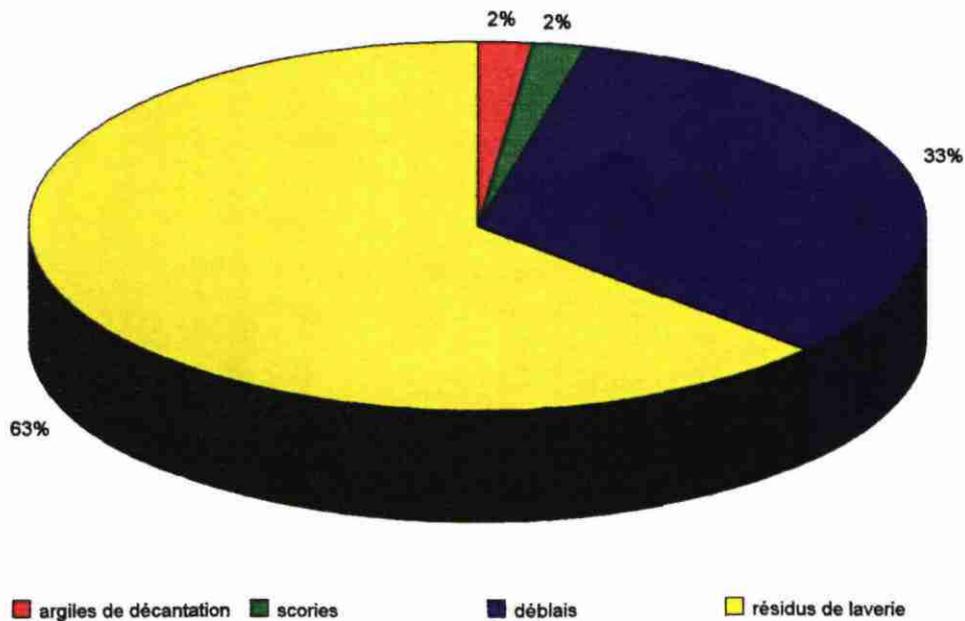
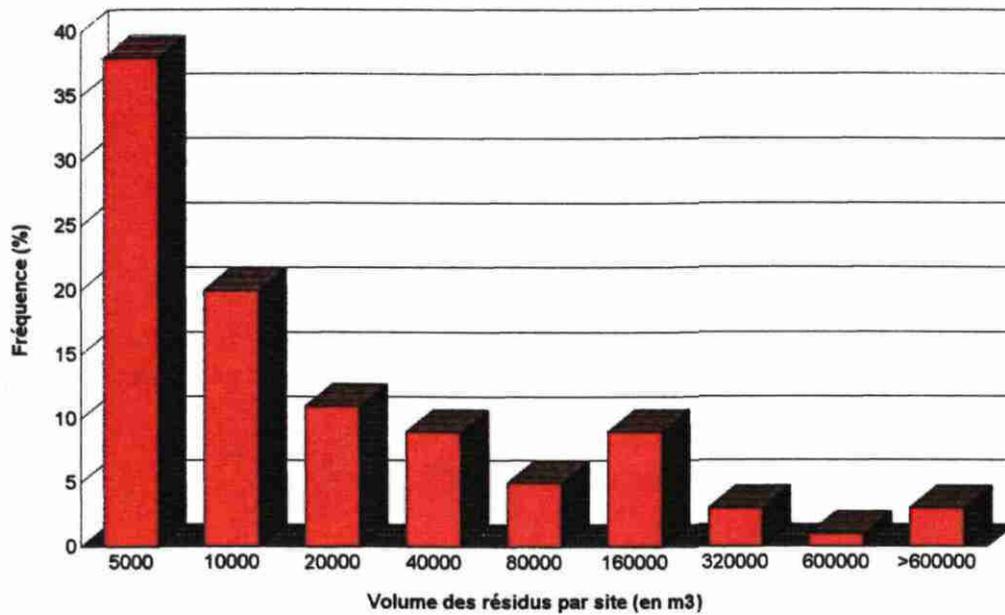


Fig. 9 - Résultats d'une enquête sur 103 sites du nord Massif central.

Résidus miniers

Outre des déblais pierreux stabilisés et de faible importance, le site présente :

- 150/180 000 m³ de rejets sablo-argileux de laverie (cf. figure 10a), pouvant contenir des teneurs appréciables en Sb, As, voire Pb + traces d'additifs de traitement du minerai ; ce dépôt est partiellement déstabilisé par ravinement ; les eaux rejoignent celles du ruisseau qui coule au pied de ces rejets ; une tentative de revégétalisation a échoué, tandis que la végétation naturelle s'implante difficilement ;
- 2 importants déblais de stériles rocheux, ravinés, portant de jeunes plantations de résineux.

SITE "Sentein" (Midi-Pyrénées)

Substance exploitée : Pb, Zn, Ag

Situation actuelle : Concession valide, orpheline.

Cadre géologique et gîtologique

Le gisement est situé dans une vaste lentille calcaire intercalée dans une série schisteuse.

On y distingue :

- des gîtes de substitution dans les calcaires.
- des gîtes filoniens dans les schistes inférieurs et supérieurs. Minéralisation principale : association de blende et galène.

Mode d'exploitation

Mine souterraine exploitée par chambres et piliers à partir de galeries subhorizontales reliées par des plans inclinés ; puits et cheminées.

Traitement du minerai

Laverie située en dehors du site ; le minerai a été traité par voie gravimétrique ; à partir de 1943, traitement mixte par gravimétrie et flottation. En 1952, une installation souterraine pour pré-concentration du minerai tout-venant par milieu dense a été établie. Le minerai enrichi était ensuite évacué vers la laverie.

Production

Depuis son origine, il aurait été extrait 125 000 tonnes de métal, soit 1 Mt de minerai titrant environ 10 % Zn et 3 % Pb.

Résidus miniers

Outre des déblais plus ou moins volumineux associés aux diverses galeries et souvent intégrés au paysage rocailleux, les résidus les plus significatifs sont représentés par :

- 3 langues de déblais localisées sur un des sites, se confondant plus bas en une seule masse : l'une provient des rejets de pré-concentration, les deux autres des déblais rocheux de creusement de galeries ;
- les déblais d'un autre site, également en altitude, intégrés au paysage, mais localement entaillés par un torrent ;
- environ 600 000 tonnes estimées de stériles de laverie, occupant deux sites en bordure de la vallée (cf. figure 10b).

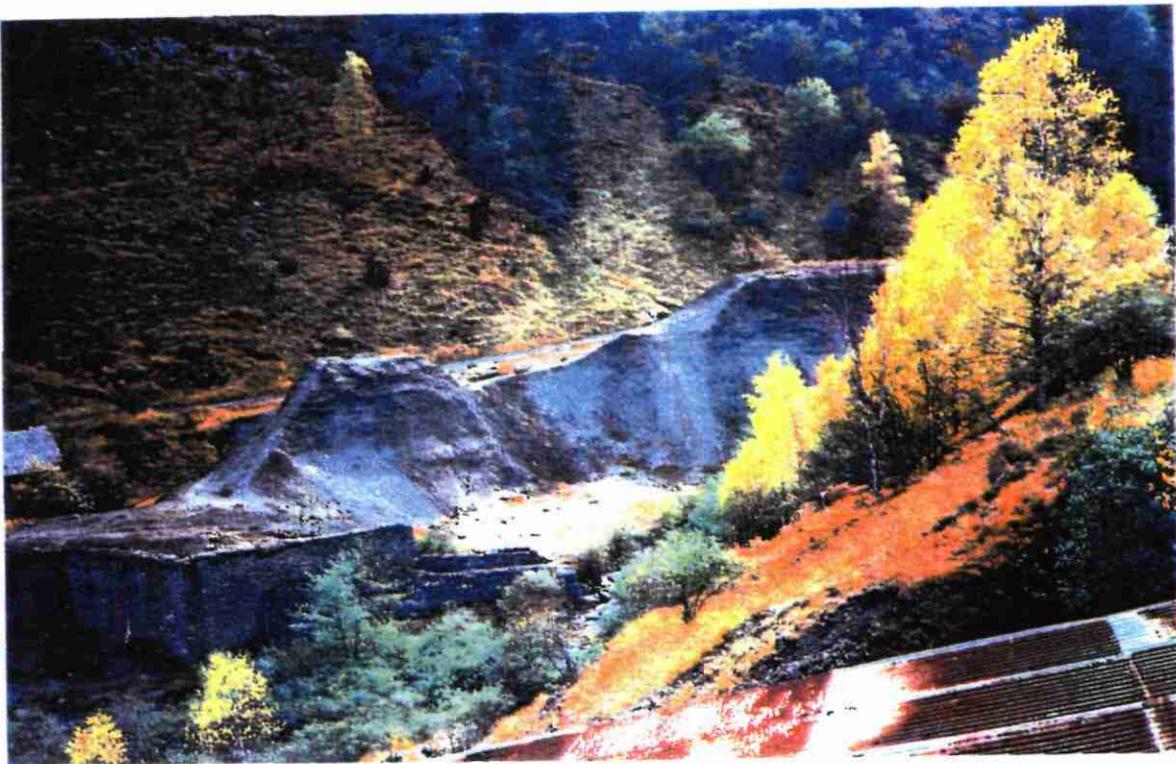


Fig. 10 - Résidus de l'usine de traitement de minerai (laverie) de deux mines métalliques anciennes.

3. Les éventuels contaminants présents dans les résidus miniers

Les résidus miniers peuvent contenir éventuellement des contaminants chimiques provenant de deux origines principales (cf. chap. 1) :

- les minéraux comprenant le minerai et sa gangue ;
- les réactifs utilisés dans les différentes filières de traitement.

Les résidus potentiellement susceptibles de poser des risques de pollution chimique de l'environnement sont donc :

- les stocks de stériles de sélectivité (minerai pauvre) ;
- et les résidus de l'usine de traitement (laverie).

3.1. LES STERILES DE SELECTIVITE "MINERALISES"

Un minerai est composé d'un assemblage de minéraux plus ou moins altérables une fois sortis de leur contexte géologique et soumis aux conditions physico-chimiques et biologiques de la biosphère. Pour certains de ces minéraux, les produits d'altération sont à la fois solubles (et/ou bioassimilables) et, au-delà d'une certaine concentration, capables de poser un danger pour l'environnement. En ce qui concerne les stériles minéralisés, le risque éventuel sera déterminé surtout par la teneur en :

- *sulfures de fer* (pyrite, pyrrotite, marcassite), phases minérales à l'origine du Drainage Minier Acide (cf. paragraphe 3.1.1),
- phases minérales comprenant des *éléments traces plus ou moins toxiques* (arsenic, métaux lourds, etc.).

De ce fait, nous pouvons focaliser notre attention dans la plupart des cas sur les résidus des mines métalliques, et certains minéraux industriels (fluorine, barytine, pyrite, andalousite).

3.1.1. Le cas particulier du "drainage minier acide"

En France, la majorité des exploitations de métaux de base (Cu, Pb, Zn), d'antimoine et d'or sont associées à des paragenèses sulfurées et des minéraux du groupe des sulfo-arséniures (arsénopyrite) et sulfo-antimoniures. Des sulfures existent fréquemment aussi dans la gangue des minerais, à priori inerte, comme la barytine, la fluorine et l'andalousite.

L'oxydation naturelle des minéraux sulfurés tels que la pyrite, la pyrrhotite, etc., exposés à l'air et à l'eau peut entraîner la production d'effluents suffisamment acidifiés et chargés d'ions métalliques pour poser de sérieux problèmes dans un milieu aquatique récepteur. Ce phénomène est plus souvent appelé Drainage Minier Acide (DMA), et constitue le problème environnemental le plus important pour les mines exploitant ce type de minerais. Ces effluents peuvent être produits par des sources naturelles (par exemple, ruisseaux en contact avec des affleurements de minéralisations sulfurées) ou par l'exposition de résidus contenant des minéraux sulfurés à l'air libre suite à des travaux miniers ; ce sont principalement les résidus de l'usine de traitement et les stériles minéralisés. Par contre, il faut noter qu'on ne rencontre pas les problèmes de DMA dans toutes les exploitations de minerais sulfurés, en particulier quand il y a présence de phases minérales capables de neutraliser l'acidité produite (calcaire, etc.).

Les caractéristiques chimiques généralement rencontrées dans un cas "classique" de DMA sont :

- une forte acidité (pH faible),
- des concentrations élevées en fer dissous,
- des concentrations élevées en certains autres éléments (Ni, Zn, Pb, Cd, As, etc.),
- des concentrations élevées en divers ions majeurs (SO_4 , ...).

En l'absence de phases neutralisantes, le taux de production de DMA est déterminé principalement par la quantité de pyrite disponible à réagir (c'est-à-dire, en contact avec les eaux en circulation), la vitesse de transfert d'oxygène atmosphérique vers la pyrite et le pH. Un pH acide est nécessaire pour favoriser la croissance des espèces bactériennes capables de catalyser le processus de production de DMA.

Pour les résidus renfermant des quantités importantes de pyrite, la production de DMA peut durer très longtemps. En revanche, la vitesse globale de production a tendance à diminuer avec le temps, en raison surtout de l'élimination progressive des phases les plus réactives, éventuellement aidées par une réduction de la vitesse de transfert d'oxygène vers la pyrite résiduelle. En effet, à l'heure actuelle les mesures de contrôle de DMA les plus efficaces sont basées sur la minimisation du transfert d'oxygène vers le résidu (par inondation, recouvrement avec des matériaux imperméables, etc.) et maîtrise de la circulation d'eau à travers le résidu. Cela implique donc que pour tout résidu ancien, il convient, en général d'éviter toute action susceptible d'augmenter l'accès d'un résidu à l'oxygène, de favoriser la circulation d'eau à travers le résidu ou d'augmenter la surface spécifique des minéraux réactionnels par broyage.

3.1.2. Les éléments potentiellement toxiques

Comme le montre le tableau 5, si la composition minéralogique des principaux minerais extraits en France est relativement simple, le spectre d'éléments traces qu'ils recèlent est plus large. Parmi les métaux et non métaux cités dans les normes et/ou directives de différents pays concernant l'évaluation de la qualité des eaux et les sols pour différents usages, 11 sont fréquents dans les gîtes français : As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Zn, soit comme constituants principaux du minerai, soit comme accompagnateurs dans la gangue. Ainsi, dans de nombreux gisements filoniens à barytine et fluorine du Massif central, la galène, la blende et la pyrite sont fréquentes. Le mispickel (FeAsS) est fréquent dans les filons à wolframite du Massif central. Certains métaux ont pu constituer un élément valorisant de tel ou tel minerai (gallium dans la bauxite, germanium et cadmium dans la blende) et se retrouvent évidemment dans les résidus.

A titre d'exemple et pour fixer un ordre de grandeur le tableau ci-dessous donne quelques fourchettes de teneurs en métaux observées dans les différents résidus d'exploitation de mines plombo-zincifères. Un autre ordre d'idée est donné par les stériles des anciennes exploitations du district de Brioude-Massiac qui contiennent fréquemment des teneurs fortes en Sb (2 à 3 %), Pb (0,15%) et As (0,3%-0,6%) (Rougeaud *et al.* 1984).

Néanmoins, il convient de se rappeler que la teneur en tel ou tel élément contaminant dans un résidu minier ne constitue qu'une première information sur le vrai risque que le résidu peut poser pour l'environnement. Pour cela il faut en plus des informations sur les facteurs et paramètres déterminant sa *réactivité* (vitesse de dissolution des phases minérales porteuses, précipitation d'éventuelles phases secondaires immobilisantes, spéciation...) et sa *mobilité* vers les compartiments eau et sol. Cela implique donc une prise en compte de la nature et contexte environnemental spécifique de chaque résidu : l'ensemble de phases minérales présentes (phases porteuses, "neutralisantes", pièges.), son état actuel d'altération (épaisseur de couches superficielles altérées et/ou lixiviées,...), présence de facteurs promouvant et/ou limitant la vitesse d'altération (circulation d'eau, accès à l'oxygène atmosphérique,...), sa stabilité (érosion, etc.).

Résidu	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cd (ppm)
Haldes d'anciennes exploitations Pb-Zn	5 000-20 000	5 000-20 000	50-200
Rejets de laverie	1 300 - 7 000	1 000-2 500	30-50
Stériles de découverte	50 - 500	200-2 000	5-10

(Source : Rougeaud *et al.* (1984), Barrés (1979), Maubert (1983).

Principales espèces minérales des minerais français et spectre d'éléments traces associés.			
Substance principale	Minéraux	Composition majeurs	Eléments traces fréquents.
Cu	chalcopryrite malachite azurite pyrite	CuFeS ₂ Cu(CO ₃)Cu(OH) ₂ 2CuCO ₃ Cu(OH) ₂ FeS ₂	Mn, As, Ag, Pb, Zn Bi, Cd, Co, Sb
Zn	blende calamine smithsonite	ZnS (ZnOH) ₂ SiO ₃ ZnCO ₃	Pb, Ag, As, Cd, Cu, Fe, Hg, In, Mn, Sb Ge, Ga,
Pb	galene cerusite anglesite	PbS PbCO ₃ PbSO ₄	Zn, Ag, Ba, As, Bi, Sb, Se
Sb Sb-Ag Ag-As	stibine pyrargyrite proustite	Sb ₂ S ₃ 3Ag ₂ S.Sb ₂ S ₃ 3Ag ₂ S ₃ .As ₂ S ₃	As, Ag, Au
Au	Au natif mispickel pyrite	FeAsS FeS ₂	Mo, Ni, Co, As, Hg, Sb.
F	fluorite	CaF ₂	Li, Ba, Cu, Pb, Zn
Ba	barytine	BaSO ₄	Pb, Zn, Hg, Cu, F
Sn	cassitérite	SnO ₂	Li, Nb, Ta, W, As
W	wolframite scheelite	(Fe, Mn)WO ₄ CaWO ₄	As, Li, Bi Cu, S, Sn

Tabl. 5 - Phases minérales des minerais français et le spectre d'éléments traces fréquemment associés.

3.2. LES RESIDUS DE L'USINE DE TRAITEMENT DU MINERAI

3.2.1. Introduction

Les rejets venant du ou des traitements du minerai constituent souvent, pour un site, une part importante des résidus miniers. La composition et la nature de ces rejets dépendent du minerai (éléments chimiques majeurs ou mineurs, minéraux présents dans le minerai de départ et se retrouvant dans les résidus,...), mais également fortement du procédé utilisé pour le traitement.

Très généralement, un procédé de valorisation de minerai est constitué d'une préparation mécanique (concassage, broyage, classification granulométrique), suivie par une ou plusieurs étapes d'enrichissement. La préparation mécanique a pour rôle d'une part de réduire la taille des blocs constituant le minerai pour la rendre compatible avec les équipements de séparation, et d'autre part de libérer les minéraux valorisables. Les étapes d'enrichissement ont pour objectif de produire des concentrés, qui sont ensuite utilisés ou commercialisés, et engendrent pour ce faire des rejets solides et liquides.

Pendant l'époque préindustrielle, les procédés de concentration du minerai ont peu évolué et les rejets, bien que souvent assez riches en métaux ou fortement pollués (cas du mercure dans les exploitations anciennes où le minerai était traité par amalgamation), ont eu un impact relativement limité sur l'environnement, car les volumes en jeu étaient très réduits et les minerais traités souvent étaient déjà oxydés. Par contre, l'utilisation à partir des années 1920 de procédés industriels combinant l'utilisation de réactifs chimiques et des broyages fins (ce qui augmente la réactivité du minerai), comme par exemple la flottation des sulfures, a augmenté considérablement les risques sur l'environnement.

3.2.2. Rappels sur les principales techniques de traitement

On peut distinguer plusieurs familles de techniques d'enrichissement.

a) Procédés de tri physique

Entrent dans cette catégorie les procédés utilisant la densité des particules ou leur susceptibilité magnétique, leur conductivité, etc.

En France, ce sont les méthodes gravimétriques, basées sur les différences de densité entre les minéraux, qui sont les plus répandues. Ces techniques sont pour certaines très anciennes. Elles ont été très utilisées dans les petites exploitations (mines d'or ou mines métalliques), car elles correspondent à des équipements peu complexes, faciles à mettre en oeuvre, et sont compatibles avec les faibles débits de telles opérations. Plus récemment, des techniques plus sophistiquées de traitement gravimétrique ont été utilisées, notamment avec l'emploi de séparation en milieu dense (usine de fluorine du Burc, usine d'andalousite de Glomel par exemple). Les milieux denses utilisés sont

constitués de particules de ferrosilicium ou de magnétite mis en suspension dans l'eau et constituent les seuls ajouts potentiels de produits pendant le procédé.

Les méthodes gravimétriques se caractérisent d'une part par un broyage assez grossier des minerais (les tailles des particules vont de quelques millimètres jusqu'à 0,2 mm environ) et d'autre part par une absence de réactifs.

b) Procédés physiques de séparation/concentration

La flottation, qui est de très loin la principale technique de séparation physico-chimique, est apparue au début du 20^e siècle. Cette technique utilise les propriétés de surface des minéraux afin de rendre certains d'entre eux sélectivement soit hydrophobes, soit hydrophiles. Le minerai, sous forme de pulpe (mélange de particules et d'eau), est mis en contact avec des bulles d'air dans des cuves agitées (cellules de flottation). Les particules hydrophobes se collent aux bulles et montent ainsi à la surface de la pulpe où elles sont récupérées. Les particules hydrophiles restent dans les cellules et s'écoulent en soutirage de celles-ci.

Cette technique utilise une grande variété de réactifs chimiques, principalement pour modifier les états de surfaces des particules. D'autre part, elle nécessite des particules suffisamment petites pour pouvoir être "soulevées" par des bulles d'air, donc généralement de taille inférieure à 0,2 mm.

Les rejets de tels traitements sont donc constitués de produits fins renfermant des réactifs résiduels.

Les réactifs utilisés en flottation se classent en :

- **moussants** : ces réactifs ont pour rôle de favoriser la formation et la stabilité des bulles. Ce sont des tensioactifs organiques (exemple : huile de pin), utilisés à de très faibles doses (5 à 100 g par tonne de minerai).
- **collecteurs** : ce sont d'autres tensioactifs organiques (exemple : xanthate, dithiophosphate). Ils confèrent l'hydrophobicité aux surfaces de certains minéraux.
- **agents modifiant le pH** : les phénomènes de surface étant souvent très sensibles au pH de la solution, des agents modifiant celui-ci (acide sulfurique, chaux, etc.) sont couramment employés dans les usines.
- **activants et dépresseurs** : on nomme ainsi les réactifs chimiques qui permettent la sélectivité de l'hydrophobisation entre les différentes phases minérales. Ils sont extrêmement variés en fonction notamment des minéraux et de leurs interactions. Sont utilisés aussi bien des sels métalliques (CuSO_4 , ZnSO_4 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, etc.) que des oxydants et des réducteurs (sulfites, permanganate de potassium,...) ou des produits organiques (amidon,...). Ces réactifs sont généralement utilisés à des doses allant de quelques dizaines de grammes à quelques kilogrammes par tonne de minerai.

Ainsi que nous l'avons déjà mentionné, les réactifs de flottation se retrouvent, au moins en partie, dans les rejets de ces traitements. Si les moussants et les collecteurs présentent peu d'impact potentiel sur l'environnement (quantités faibles, produits organiques dégradables), cela n'est pas le cas de certains activants ou dépresseurs (cyanure de sodium, sels métalliques tels que le bichromate,...).

c) Procédés chimiques de extraction/concentration de l'élément valorisable

De tels procédés recouvrent à la fois les techniques de lixiviation (dissolution) et celles de récupération des éléments dissous (par précipitation, cémentation,...). *Ils sont bien sûr caractérisés par une utilisation importante de réactifs chimiques (acides, bases, oxydants, complexants,...).*

En France, les procédés chimiques de traitement de minerais sont principalement utilisés pour l'uranium et pour l'or. Pour ce dernier, deux types principaux de traitement ont été employés : les procédés de cyanuration et ceux utilisant l'amalgamation :

- la cyanuration repose sur une mise en solution de l'or, par complexation par du cyanure en milieu aqueux (à pH élevé afin d'éviter la formation d'acide cyanhydrique). L'or est ensuite extrait de la solution (par piégeage sur charbon actif, par précipitation, voire, dans certains procédés du début du siècle, par acidification du milieu, etc.). Les rejets solides, rincés, sont mis en dépôt ;
- l'amalgamation consiste à utiliser du mercure pour passer de l'or en solution dans ce dernier. Le mélange des deux métaux Au-Hg, appelé amalgame, est séparé du reste du minerai, puis distillé, ce qui permet d'évaporer le mercure pour récupérer l'or.

La présence potentielle de réactif résiduel, principalement le mercure, dans les amas de rejets solides et dans les effluents, constitue l'un des principaux dangers potentiels associé aux résidus des exploitations d'or ayant utilisé de tels procédés.

d) Procédés thermiques

En métallurgie, ces procédés consistent principalement en des grillages (en milieu oxydant, en présence de chlore,...) de minerais ou de concentrés de minéraux. Ces procédés engendrent non seulement des produits de grillages, mais également des suies. Ils nécessitent parfois l'ajout de réactifs (par exemple, fondants : fluor, borax,...).

Très souvent, le traitement d'un minerai donné s'effectue par une combinaison des techniques citées ci-dessus : par exemple, il peut y avoir une première concentration par flottation, grillage du concentré, puis lixiviation des produits grillés.

Par ailleurs, le plus souvent, le procédé de traitement de minerai évolue au cours de la vie de l'exploitation, pour s'adapter par exemple aux variations du minerai (faciès, teneurs,...) liées aux travaux miniers, ou pour améliorer les performances de l'usine en profitant de

développements technologiques. Ainsi, pour un même site, on peut observer différents types de résidus correspondants aux procédés successifs employés dans l'usine.

Le tableau 6 ci-après présente les principales méthodes de traitement utilisées en France pour les diverses substances exploitées, ainsi que les réactifs susceptibles d'entraîner un danger sur les sites (cf. paragraphe 3.2.4).

3.2.3. Quelques filières de traitement types

a) Pb/Zn

Le traitement industriel des minerais à plomb-zinc était, au XIX^e siècle, assuré par des laveries de circuit assez simple, le plus souvent constitué d'un atelier de concassage suivi par une séparation gravimétrique (exemple : la laverie de Peyrebrune, vers 1895, se composait de: concasseur à cylindres et trommel -atelier de broyage-, et bac à piston -gravimétrie-).

La flottation, qui s'est développée industriellement à partir de 1910, s'est surtout répandue à partir de 1920, entraînant en contrepartie une certaine désaffection pour les procédés gravimétriques (pour reprendre l'exemple de Peyrebrune, un atelier de flottation a été installé dans l'usine à partir de 1928-1929). Une des caractéristiques importantes, pour son impact potentiel sur l'environnement, du traitement de minerais à plomb-zinc est la relativement fréquente utilisation d'une méthode de flottation différentielle reposant sur une dépression au cyanure. Elle consiste, schématiquement, en une flottation de la galène en tête, après dépression de la sphalérite par du cyanure de sodium, puis par une étape de flottation de la sphalérite, réactivée par du sulfate de cuivre (cf. exemple du circuit de l'usine de La Croix de Pallières, vers 1960, donné figure 11).

Les réactifs de flottation qui ont été les plus couramment utilisés dans le traitement des minerais de plomb-zinc sont des xanthates, des sulfates de zinc, de cuivre, de la chaux et, comme mentionné ci-dessus, du cyanure de sodium.

Des variantes de circuit existent, bien sûr, en fonction des éléments valorisés (concentré plomb seul par exemple, ou production d'un concentré de pyrite en addition des concentrés Pb et Zn, etc.). Cela se traduit en particulier par des combinaisons spécifiques de réactifs. Il convient en particulier de noter que, lorsque la dépression de la sphalérite n'était pas recherchée, il n'y avait pas d'utilisation de cyanure de sodium.

Le tableau 7 présente quelques exemples de consommation de réactifs pour des circuits ayant fonctionné vers 1962.

Substance exploitée	Principales techniques de traitement utilisées	Réactifs potentiels susceptibles d'entraîner un danger
Pb/Zn	gravimétrie flottation	NaCN, dichromate
Cu	Flottation	-
Pyrite	Concassage Gravimétrie Flottation	-
Au (Ag)	Gravimétrie Amalgamation Flottation Grillage Lixiviation	Hg, HgCl ₂ Cyanures
W Sn	Gravimétrie Flottation	-
Sb	Gravimétrie Flottation Grillage	PbNO ₃
F	Gravimétrie Flottation	-
Ba	Gravimétrie Flottation	Dichromate, sels de Pb
Talc	Tri manuel, mécanique et optique	-
Andalousite	Gravimétrie Flottation	-

Tabl. 6 - Techniques de traitement de minerai et réactifs potentiels susceptibles d'entraîner un risque environnemental.

Réactif	Consommation (g réactif par tonne minerai)		
	La-Croix-de-Pallières	Pierrefitte	Les Malines
Sulfate de zinc	620	0	143
Sulfate de cuivre	620	82	126
Xanthates	790	41	39
Cyanure de sodium	40	15	28

Tabl. 7 - Quelques exemples de consommation de réactifs pour des circuits de traitement de minerais de Pb-Zn ayant fonctionné vers 1962.

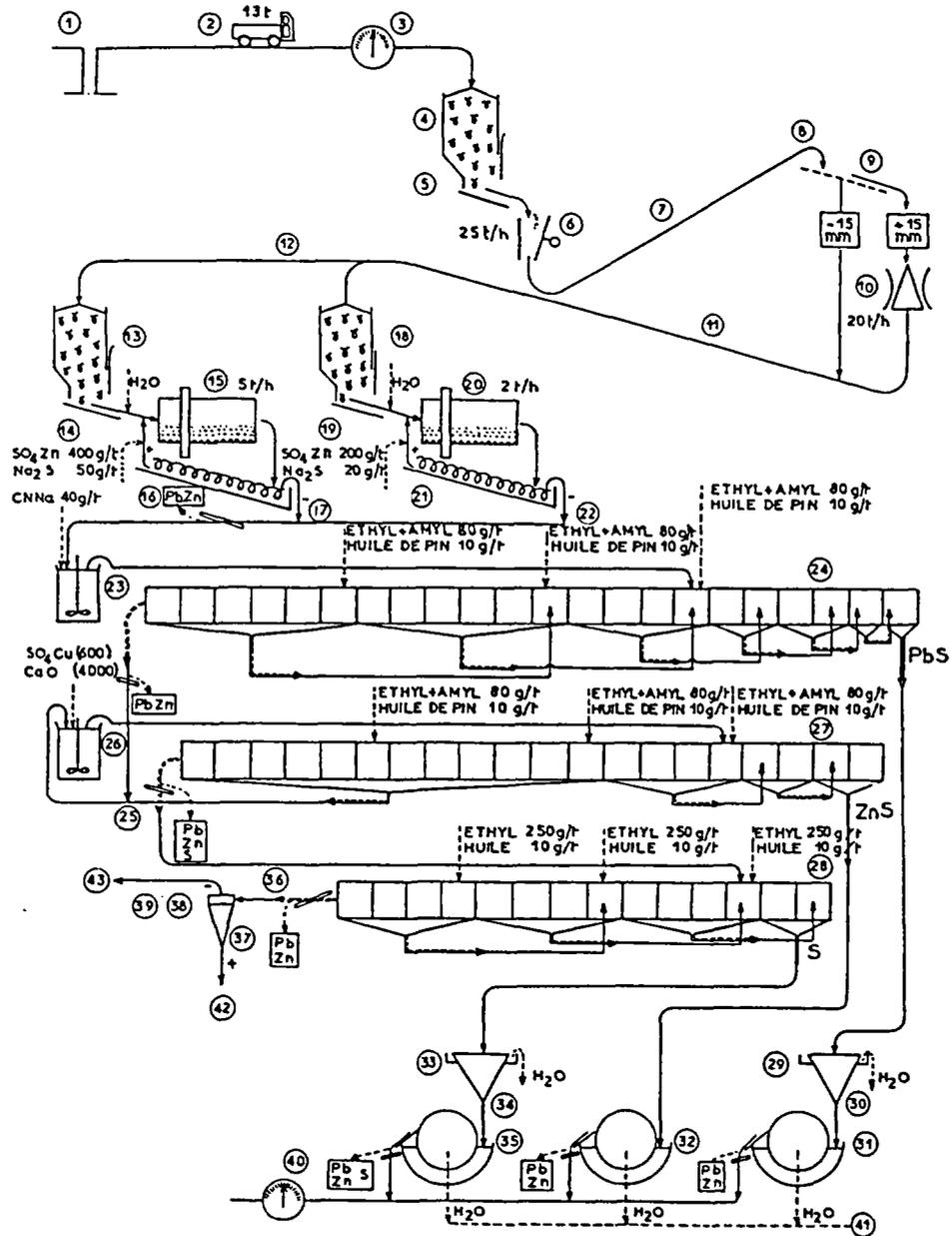


Fig. 11 - Schéma des filières utilisées dans une usine de traitement de minerai Pb/Zn.

b) Or

Le traitement de l'or par des techniques sommaires de gravimétrie - orpillage - est extrêmement ancien en France (il remonte à l'époque gauloise). Au XIX^e siècle, les pratiques sont devenues plus industrielles, avec des équipements de broyage et de tri gravimétrique permettant d'assurer une plus grande capacité de traitement. Cette évolution s'est accompagnée, en parallèle du développement des procédés utilisant l'amalgamation au mercure. L'utilisation du mercure pour récupérer l'or est également très ancienne -elle était connue par les grecs-, mais son emploi industriel s'est surtout répandu au XIX^e siècle, avec une apogée au cours des dernières décennies de celui-ci.

Puis, dès 1900, la cyanuration a remplacé progressivement ces procédés, et il existe de nombreux exemples où, entre les années 1900 et 1930, des techniques mixtes amalgamation-cyanuration furent utilisées. Par exemple la mine de La Lucette a produit environ 8 t d'or, avant 1930, par un circuit comportant broyage, amalgamation et cyanuration. L'usine des Farges (Mine de Chéni) présente, à la même période, un circuit comportant les mêmes ateliers (cf. fig. 12).

Le schéma de principe du traitement peut présenter des variantes, notamment lorsque le minerai est réfractaire, c'est-à-dire donne de faibles rendements de récupération d'or par amalgamation ou cyanuration directe. Une étape de traitement thermique (grillage) est alors souvent incluse. Par exemple, à la mine du Châtelet, l'usine a utilisé dans un premier temps un circuit avec une amalgamation directe suivie d'une cyanuration. Cependant, ce dernier donnant de mauvais résultats, il est rapidement abandonné (1909) au profit d'un procédé comportant un grillage du minerai, puis une cyanuration des cendres. Le circuit a ensuite été amélioré entre 1920-1930, par l'ajout, en tête, d'une flottation des sulfures. Le grillage, qui ne porte plus que sur les concentrés de flottation, est ainsi plus économique. Les cendres obtenues sont ensuite cyanurées, comme précédemment. Le principe de ce dernier procédé sera maintenu lors des diverses modifications de circuit intervenues au cours des décennies qui suivirent.

Les procédés récents utilisent un large éventail de techniques allant de la cyanuration directe (Rouez) à une combinaison complexe flottation - pyrométallurgie (Salsigne).

c) Pyrite

Lorsqu'ils constituent la production exclusive du site (et non un sous-produit de la valorisation d'autres minéraux) les concentrés de pyrite, du fait de leur faible valeur marchande, proviennent de circuits de traitement souvent sommaires. Ces derniers peuvent être réduits au seul concassage (Sain-Bel par exemple) ou correspondre à des schémas faisant intervenir différentes techniques (usine de la mine de pyrite de Chizeuil : broyage, gravimétrie et flottation), tout en restant notablement plus simples que les circuits de valorisation des autres sulfures. De la même manière, les réactifs de

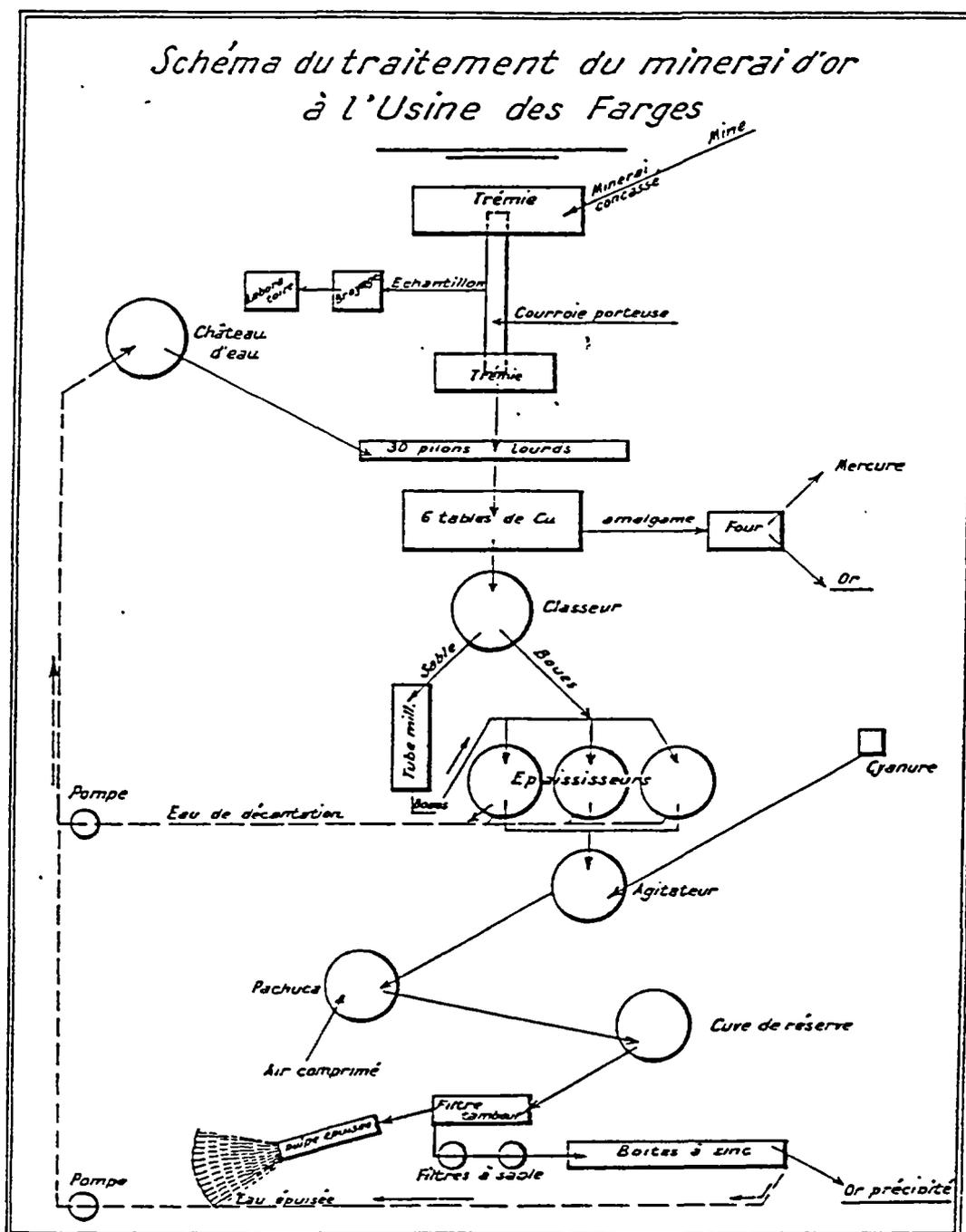


Fig. 12 - Schéma des filières utilisées dans une ancienne usine de traitement de minerai d'or.

flottation, lorsque cette dernière est employée, sont en nombre réduit (xanthates et moussants).

d) Fluorine

La production de concentrés de fluorine a été réalisée initialement, en début de siècle, par des opérations simples de tris manuels et broyage, auxquelles se sont rajoutées des étapes de séparation gravimétrique. L'introduction de la flottation dans les circuits est apparue plus tardivement que pour les minerais sulfurés, puisque l'usine de Pierre Bénite fut, en 1941, la première installation industrielle à utiliser cette technique sur de la fluorine.

Les procédés récents de production de concentrés de fluorine utilisent soit la flottation (usine de Montroc par exemple), soit la gravimétrie en milieu dense - ferro silicium - (usine du Burc, Tarn).

3.2.4. Commentaire sur le devenir des réactifs de traitement

Comme le montre la figure 13, les réactifs chimiques "consommés" dans les différentes filières d'enrichissement d'un minerai (cf. paragraphes 3.2.3 et 3.2.4), s'ils ne sont pas dégradés lors de ces procédés, se retrouveront en sortie de l'usine soit dans un circuit d'eau usée, soit déposés dans un lieu de stockage de résidus solides (généralement humides). La fraction de la quantité totale (ajoutée) de réactif, rejetée dans ce dernier, peut varier de très faible jusqu'à assez importante en fonction des caractéristiques chimiques du réactif, des particularités des procédés de traitement utilisés, de la nature du minerai, etc.*

Un réactif qui se trouve en quantité non négligeable dans un stockage de résidu de traitement peut subir des évolutions diverses, lesquelles détermineront si, oui ou non, il peut éventuellement poser un risque pour l'environnement. Il peut :

- être mobilisé plus ou moins directement vers l'environnement par lixiviation, érosion, ...
- "se dégrader", plus ou moins rapidement et plus ou moins complètement, en composés plus ou moins toxiques : biodégradation de réactifs organiques (tensioactifs, ...), oxydation du cyanure (cf. commentaire spécifique ci-après), ...

* Dans le cas d'une mine moderne, l'ensemble des eaux usées générées par le traitement de minerai (y compris les eaux provenant des digues et/ou terrils de résidus) seront soumises à des procédés de traitement supplémentaires avant rejet à l'environnement ou recyclage vers l'usine. Certains de ces procédés de traitement génèrent des phases solides précipitées - les "boues de traitement" - comprenant des quantités non négligeables d'éléments métalliques (Fe, métaux lourds, etc.) provenant du minerai et/ou des réactifs (sels de Pb, Cu, Zn, ...).

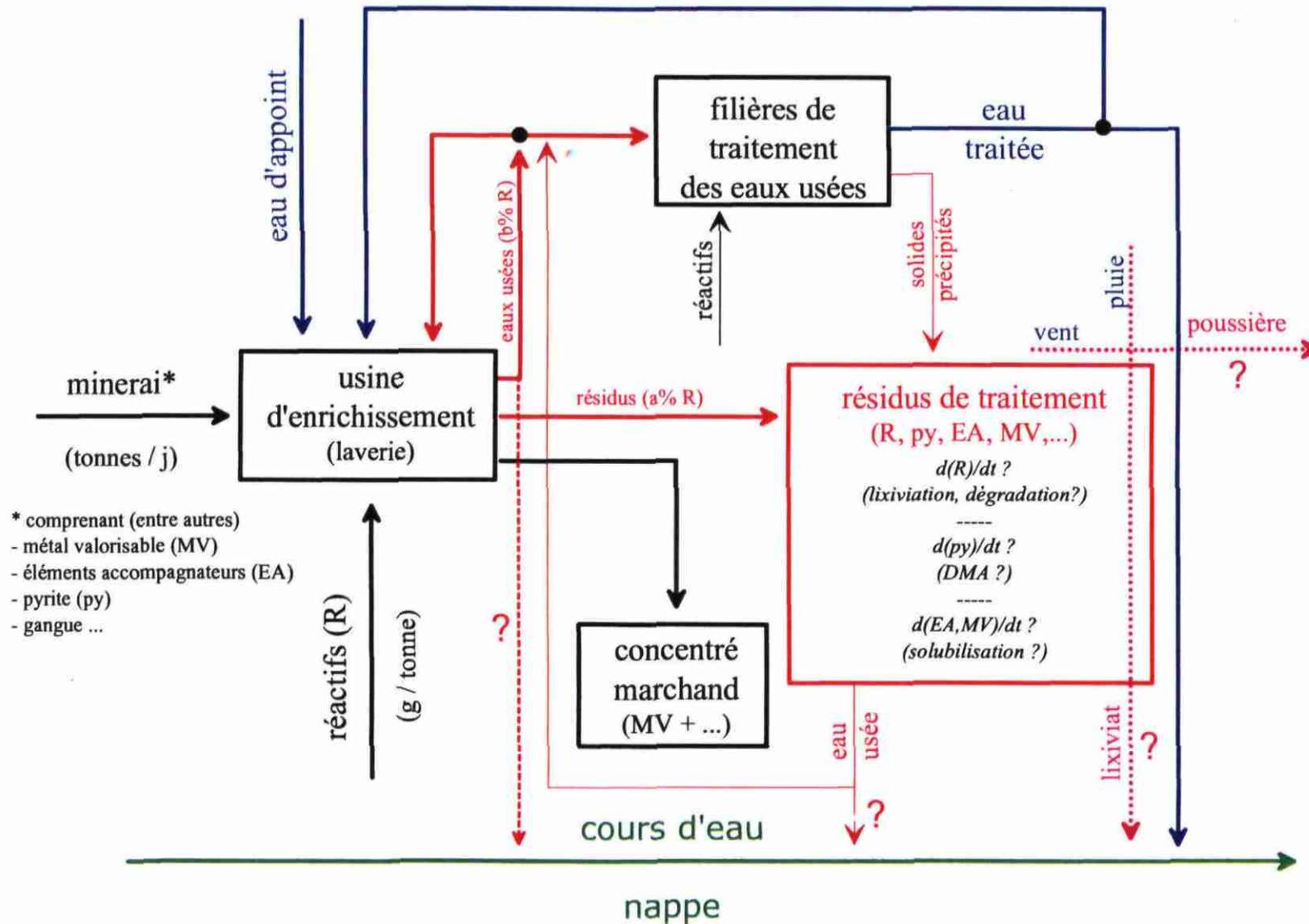


Fig. 13 - Schéma global des processus éventuellement déterminant le flux de réactifs de traitement (et d'autres contaminants originaires du minerai) vers l'environnement.

- être "piégé" sous forme peu toxique, peu soluble et/ou peu mobile : fixation de certains métaux lourds sur les surfaces des oxydes métalliques et argiles (complexation de surface, échange cationique), formation de composés ou phases solides stables (complexes de cyanures métalliques - cf. commentaire ci-après), ...

Encore une fois, il convient de signaler la nécessité de prendre en compte les différents facteurs et paramètres, donc la nature et le contexte environnemental spécifique de chaque résidu, susceptibles de déterminer le vrai risque pour l'environnement par tel ou tel réactif de traitement.

Commentaire sur les cyanures

Lorsque le cyanure est utilisé dans des procédés de flottation, par exemple pour déprimer la sphalérite, il est généralement ajouté dans le circuit sous forme de cyanure de sodium. Le devenir de ce produit en solution est alors complexe, et dépend entre autres de la composition minéralogique du minerai. Outre les ions cyanure (CN^-), il y a formation de complexes de cyanures métalliques stables (notamment avec le fer, le cuivre et le zinc), de thiocyanate (CNS^-) et de cyanate (CNO^-). La toxicité potentielle de ces composés, et en particulier des complexes métalliques, est plus faible que celle de l'ion CN^- . D'autre part, le cyanure libre se dégrade relativement rapidement (oxydation, favorisée par les ultra-violets, bactéries, etc.). Au Canada, où des installations récentes emploient du cyanure pour déprimer des minéraux cuprifères, la teneur en cyanure des eaux usées s'avère souvent assez basse pour qu'elles puissent être rejetées sans traitement.

Lorsque le cyanure est utilisé pour la mise en solution de l'or, les concentrations utilisées sont bien supérieures à celles des procédés de flottation. Un traitement des effluents du procédé est alors réalisé. Le cyanure étant facilement oxydable, ce traitement est aisé, et les méthodes actuelles de destruction des cyanures en solution sont nombreuses et performantes (oxydation par de l'hypochlorite, par de l'eau oxygénée, etc.).

3.2.5. Stockage des résidus de traitement

Comme les procédés de traitement sont essentiellement en voie humide, il est souvent nécessaire d'opérer une séparation solide-liquide. Cette séparation est d'autant plus délicate que les produits solides sont fins.

Pour les traitements gravimétriques, ces opérations ne posent pas de problème important. Il y a peu de fines car le broyage est grossier. Les produits grossiers sont égouttés et mis en tas ou épandus. Les fines sont soit rejetées directement dans les cours d'eaux (anciennes petites exploitations), soit décantées (avec des décanteurs de volume généralement réduit).

Pour les rejets provenant d'une flottation ou d'autres traitements nécessitant un fort volume d'eau et portant sur des produits relativement fins, il y a souvent constitution de bassins de décantation. La technique la plus courante consiste à opérer une séparation granulométrique entre produits grenus ("sableux") et le mélange eau plus fine. Le "sable" sert à constituer la digue bordant le bassin. Les fines décantent à l'intérieur de celui-ci et s'y accumulent. Ces bassins de décantation combinent donc la fonction de stockage des produits solides et celle de clarification des effluents. Outre les fines provenant du

minéral par broyage, ces bassins peuvent également retenir des précipités formés par exemple lors de la neutralisation d'effluents de traitement acides. Ces bassins peuvent soit rester en eau après exploitation, les solides contenus restent alors à l'abri de l'air, soit être drainés, de façon volontaire et contrôlée ou non (rupture de digue).

Les rejets du traitement des minerais sont généralement stockés sur le site minier, et les caractéristiques de la "structure" de stockage (verse, bassin, terril,...) peuvent avoir une forte influence à la fois sur la mobilité des résidus et sur leur réactivité, donc sur leur impact environnemental potentiel. Un stockage bien conçu, bien construit et bien entretenu, peut minimiser, voire éliminer les risques posés aux eaux et sols environnant le site. En revanche, un stockage instable, favorisant l'érosion, la lixiviation et, en certains cas, l'accès à l'oxygène (cf. paragraphe 3.1.1) amplifiera certainement les effets négatifs.

4. Typologie des résidus miniers dans une perspective environnementale

Dans ce chapitre, nous proposons de donner un aperçu "typologique" des résidus miniers d'un point de vue "environnemental". Cette typologie est donc basée sur les principes et facteurs globaux critiques présentés dans le Chapitre 1.3 ; elle traite plus particulièrement des résidus résultant des exploitations de substances métalliques, exception faite de Fe et Al.

Il faut néanmoins souligner le fait que, dans le cadre de cette étude, nous ne pouvons que rester à un niveau typologique assez superficiel. En effet, la nature hautement complexe à la fois des caractéristiques des sites miniers anciens et modernes, de leurs situations environnementales, de l'âge de leurs résidus, etc. rend difficile l'utilisation d'une telle typologie à des fins décisionnelles. Comme nous l'avons signalé à plusieurs reprises, les particularités de chaque site et de chaque type de résidu peuvent être appréciées correctement seulement au moyen d'un constat direct.

4.1. FACTEURS ET PRINCIPES TYPOLOGIQUES GLOBAUX

Pour mémoire, les effets négatifs potentiels des résidus solides stockés sur un site minier peuvent être imputés de manière globale à :

- leur transport hors site, leur *mobilité*, sous forme de matière en suspension dans les eaux et/ou poussière ;
- leur *capacité polluante chimique*, leur capacité à augmenter significativement la concentration en éléments et composés posant potentiellement un risque pour les eaux et les sols ;
- et leur impact sur les *qualités "esthétiques"* de l'environnement du site.

Deux sources potentielles d'éléments et/ou composants contaminants ont été évoquées :

- les *phases minérales* présentes naturellement dans le minerai et sa gangue ;
- et les *réactifs* introduits lors des diverses filières de traitement mises en oeuvre dans une usine d'enrichissement.

Ces éléments et/ou composants contaminants peuvent être éventuellement retrouvés principalement dans deux types de résidu minier :

- les *résidus minéralisés* mais non traités (stériles "pauvres") - phases minérales seulement ;
- et les *résidus issus de l'usine de traitement* - phases minérales et réactifs.

Comme le montre la figure 14, *la substance valorisable* et son *contexte minéralogique*, c'est-à-dire la composition du minerai et sa gangue, auront un effet déterminant sur la nature, la réactivité et la quantité des phases minérales résiduelles et réactifs chimiques employés. Ces paramètres peuvent varier énormément dans le temps suite à des variations dans la nature du gisement et les procédés de traitement utilisés.

Les *quantités* (absolues et relatives) des différents types de résidus miniers seront fonction des caractéristiques du gisement et de la méthode d'exploitation utilisée (MCO, MST). Cette dernière, en conjonction avec le contexte environnemental particulier du site minier, déterminera en grande partie les "impacts esthétiques" que les résidus miniers peuvent potentiellement poser à l'environnement.

4.2. TABLEAUX TYPOLOGIQUES ET RECAPITULATIFS

Dans ce chapitre nous proposons trois tableaux récapitulatifs dont l'objectif est soit de donner une "vue d'ensemble" des facteurs et phénomènes susceptibles d'influencer le degré d'impact environnemental des différents types de résidus miniers (quelle que soit la substance exploitée), soit d'indiquer la nature des impacts potentiels par type de substance exploitée.

- **Tableau 8** : Description typologique des résidus miniers incluant certaines caractéristiques globales susceptibles de déterminer soit leur mobilité, soit leur capacité polluante chimique.
- **Tableau 9** : Typologie de certaines substances exploitées (mines métalliques (hors Fe et Al), pyrite, fluorine, barytine) présentant plusieurs caractéristiques du gisement et d'exploitation pouvant avoir une incidence sur la quantité et la capacité polluante des stériles minéralisés et de traitement.

Ce tableau sert surtout à illustrer *la complexité* et *diversité* de la nature des gisements (gîtologie, minéralogie, mode d'exploitation) exploités, surtout pour les métaux de base et l'or. Ces différences pourront avoir un impact important sur la capacité polluante chimique des stériles minéralisés et les résidus de traitement (cf. figure 14). Par exemple, les stériles provenant d'un gisement Pb/Zn pyriteux, *mais carbonaté*, produiront en général moins d'effluents acides (DMA) vu le pouvoir neutralisant de la gangue.

- **Tableau 10** : Typologie de certaines substances exploitées (mines métalliques (hors Fe et Al), pyrite, fluorine, barytine) en termes d'impacts environnementaux potentiels.

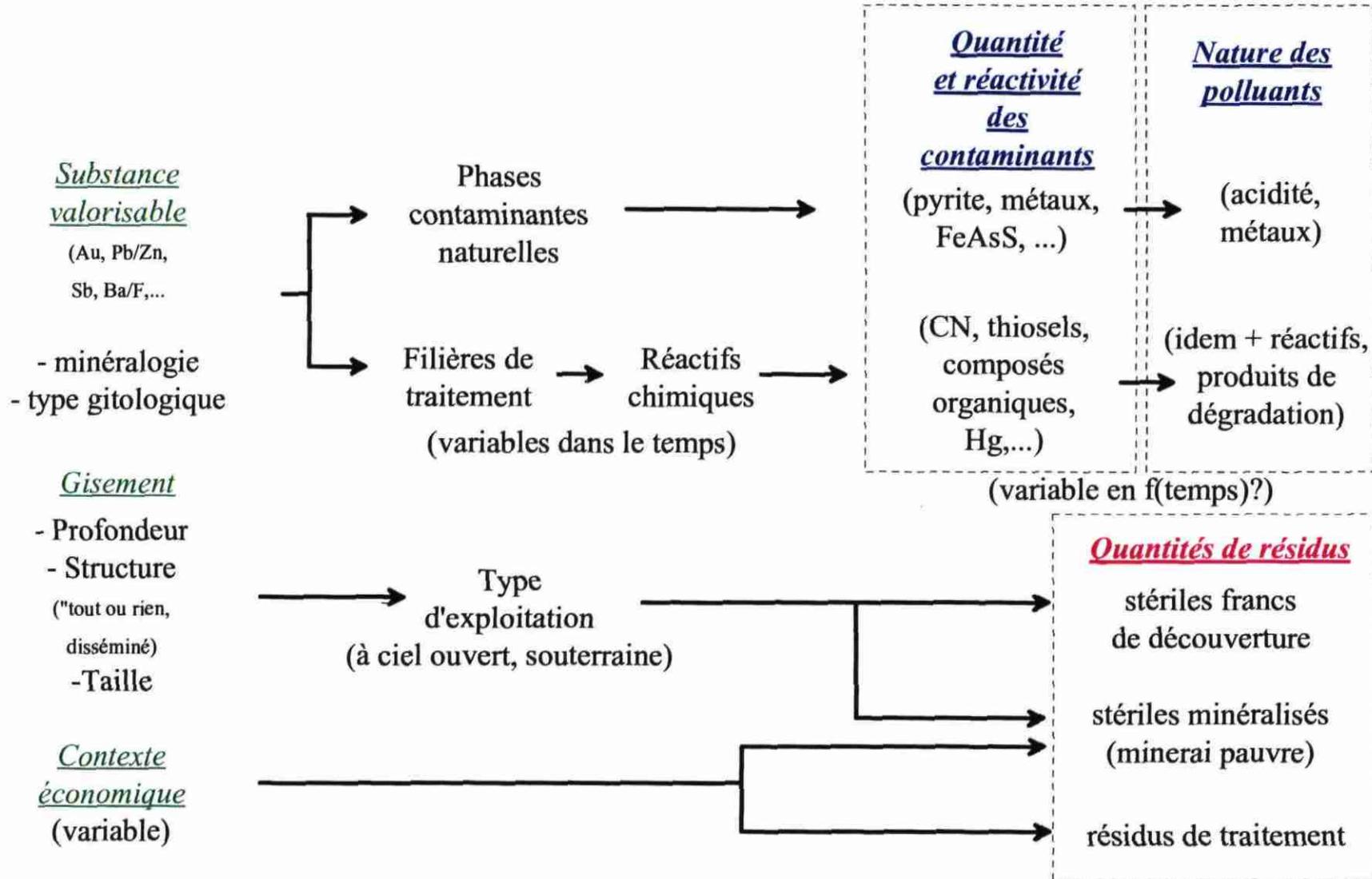


Fig. 14 - Certaines relations de "cause à effet" susceptible d'influencer l'impact environnemental des résidus miniers.

TYPE DE RESIDU	Caractéristiques contribuant à la mobilité (distribution des tailles des particules) <i>impact potentiel</i>	Caractéristiques contribuant à la capacité polluante chimique (teneur en contaminants / réactivité) <i>impact potentiel</i>
<u>Résidus de découverte, d'infrastructure</u> (stériles francs)	Moyen à grossier hétérogène ↓ grossier homogène <i>résidu a priori peu mobile</i>	Teneur en éléments et réactivité chimique égaux ou inférieurs au fond géochimique et "réactivité" naturels <i>résidu a priori à faible capacité polluante</i>
<u>Résidus d'exploitation</u> ("stériles" au sens économique, éventuellement contaminants à cause de leur contenu en divers éléments/phases minérales (métaux lourds, pyrite, arsénopyrite,...))	Idem <i>résidu a priori peu mobile</i>	variable en fonction du type de gisement et de la méthode minière utilisée — teneurs et réactivité proches des niveaux naturels ↓ significativement plus élevées <i>capacité polluante = fonction du minerai + gangue, temps</i>
<u>Résidus de traitement</u> (laverie, flottation)	fine homogène (humide lors de la mise en dépôt) <i>résidu éventuellement assez mobile en fonction de la stabilité du stockage et du contexte environnemental</i>	teneurs éventuellement élevées en phases minérales et éléments polluants (pyrite, métaux lourds, arsénopyrite) et/ou en réactifs chimiques de traitement (CN, Hg, dépresseurs) réactivité potentiellement très élevée <i>capacité polluante = fonction du minerai + gangue, procédés de traitement, temps</i>

Tabl. 8 - Typologie des résidus miniers en termes de caractéristiques globales.

4.3. QUELQUES EXEMPLES DE CONSTATS D'IMPACTS RESIDUELS D'ANCIENNES MINES

En concertation avec les exploitants, l'administration s'est préoccupée constamment de l'impact environnemental éventuel des mines en activité ou récemment arrêtées. Des études ont été demandées au BRGM, qui constituent aujourd'hui quelques "études de cas" pouvant donner une idée du type des observations à faire, et des difficultés de diagnostics. Bien que ces études de cas soient aujourd'hui anciennes et leur contenu

Substance exploitée	Géologie		Minéralogie		tonnage exploité	Mode d'exploitation	Exemples
	Type	Sous-type	principale	certaines éléments traces			
Métaux de base							
Cu, Pb, Zn	amas sulfurés			Ba,Zn,Pb,	25kt Cu	MCO et MST	St Bel,Chizeuil.
Pb-Zn	sedex		ZnS,PbS,Pyr	Hg,As,Ba,Ni,Co,Sb	260kt	MST	Pierrefite
Pb-Zn	sédimentaires	détritiques carbonatés	PbS,ZnS	Ge,Ga,Cd	100-900kt	MST	Largentière
			ZnS,PbS,Pyr	As,In,Ge,Sb,Hg	114 kt		La Croix de Pallière
			PbS(ZnS)	Cu,W,Po,	55kt	MST	La Loubatière
Pb-Zn (Ag)	filons	carbonatés plutoniques	ZnS,PbS	Py,Pyrh,Cu	20-120kt	MST	Rabasse,La Loubatière
			ZnS,PbS,..	Cd,Ge,Ag	100-290ktZn	MST	St Salvy,Peyrebrune
Or							
Au(Ag,Cu,Bi,As)	filons		Py,Msp	Cu,As,S...	5-20t	MST et MCO	Le Bourmeix
				Cu,Pb,Zn,Mo,Sb	2.4t Au	MCO	Rouez
Au (Fe)	amas	chapeau fer	Pb,Zn,Cu		8t Au ; 42kt Sb	MST	La Lucette
Au-Sb		filons	Py,Sb ₂ S ₃ ,Msp		97t Au	MCO et MST	Salsigne
Etain							
Sn	résiduels	placers	SnO ₂	Tml	5,2kt	MCO	St Renan
Sn+Kaol.		disséminés	SnO ₂	Nb,Ta	20-50 kt/an	MCO	Echassières
Tungstène							
W	filons,stockwercks skarns		(Fe,Mn)WO ₄ CaWO ₄	Cu,As,Bi,B Pyr,Cu,Zn,Bi, Msp	1000-1500t 5000-10000t	MST MST	Enguiales Salau
Antimoine							
Sb	filons		Sb ₂ S ₃	Au Cp,ZnS,Py,Msp	0,9 kt Sb 1 à 18 kt Sb	MCO et MST MST	Les Brouzils Rochetrejoux

Pyr : pyrrhotite ; Py : pyrite ; Cp : chalcopryrite ; Msp: Arsénopyrite ; Tml : Tourmaline
MCO : mine à ciel ouvert ; MST : mine souterraine;

Tabl. 9a - Typologie de certaines substances industrielles exploitées, en termes de caractéristiques du gisement et d'exploitation.

Substance exploitée	Géologie		Minéralogie		tonnage exploité	Mode d'exploitation	Exemples
	Type	Sous-type	principale	certaines éléments traces			
<i>Pyrite</i>	amas sulfurés		Py, CuFeS ₂	Mo, Pb, Zn, As Co, Ni	10-20Mt	MCO	Saint Bel
<i>Fluorine</i>	amas filon	BPGC socle F-U	CaF ₂	Fe, Pb, Ba Cu, Pb, Zn, As, Bi Cu, Bi, As U, Pb,	1,1Mt CaF ₂ 5 à 430Kt 50 à 800Kt 30Kt	MCO MST et MCO MST MST	Escaro LeBurg, Montroc Fontsante Cros Blanc
<i>Barytine</i>	filons sédimentaire		Ba	Pb, CaF ₂ , Zn CaF ₂ , HgS	10 à 680Kt 1-3Mt	MST MCO et MST	Les Porres Chaillac, Pessens

BPGC : Blende, Pyrite, Galène, Chalcopryrite ; F-U : Fluorine-Uranium

Tabl. 9b - Typologie de certaines substances industrielles exploitées, en termes de caractéristiques du gisement et d'exploitation (suite).

Substance exploitée	Indicateurs de la quantité et dispersion territoriale des résidus de traitement		Minéraux et éléments potentiellement présents dans le gisement et pouvant avoir une incidence sur la capacité polluante des stériles minéralisés et résidus de traitement		Réactifs potentiellement présents dans les résidus de traitement	
	Quantité estimée des résidus de traitement (Mt) (cf. tab. 4)	Nombre de mines (tailles limites, cf. tab. 2,3)	Sulfures de fer (pyrite, pyrrhotite) --- production de DMA possible	Eléments contaminants éventuels du minerai (autres que l'élément exploité)	Réactifs potentiellement dégradables	Réactifs non dégradables
Pb/Zn/Cu	50	36	- → +++	Hg,As,Ni,Cd,Co,Sb,Ge,..	CN	CrO ₄
Au(Ag)	20	14	- → +++	Cu,As,Pb,Zn,Mo,Sb	CN	Hg (anc.)
W-Sn	4,5	12	+	Cu,As,Bi,B,Nb,Ta		
Sb	5	13	++	Zn		PbNO ₃
Fluorine	25	19	+	Pb,Cu,Zn,As,Bi,U	-	-
Barytine	15	14	+	Pb,Hg,Zn	-	CrO ₄ , Pb
Pyrite	10	4	+++	Pb,Zn	-	-
Andalousite	-	1	+	??	-	-

(-, +, ++, +++): absent, présent en quantité faible (+) à importante (+++)

Org. : réactifs organiques ; (anc.) anciennes exploitations

Tabl. 10 - Typologie des stériles minéralisés et des résidus de traitement.

Dans le cadre des "Inventaires d'impacts résiduels d'anciennes mines" réalisés sur une vingtaine de sites pour les ministères de l'Industrie et de l'Environnement dans les années 1980 il est apparu que les résidus miniers posaient à cette époque des problèmes environnementaux préoccupants notamment pour les exploitations de plomb-zinc (mines de Chatiac-Maleval, Saint-Cierge-la-Terre, La Croix-de-Pallières...), d'or-argent (mines du Châtelet, de la Fagassière, de Cheni...), d'antimoine (mines d'Ouche, de la Bessade, du Dahut...), de wolframite (tungstène), (mines d'Enguiales et du Puy des Vignes). Les problèmes soulevés le plus souvent concernaient alors la pollution chimique ou mécanique des eaux de surface, l'absence de végétation (et/ou son dépérissement), et la dégradation du paysage. Par contre, pour les exploitations de fluorine (exploitations de Valzergues et de Voltenne) et de barytine (mine du Bardet), aucune contamination par les stériles, par ailleurs peu abondants, n'était signalée à cette époque.

Des constats d'impacts de mines, réalisés pour le ministère de l'Environnement ou l'ANRED, entre 1983 et 1985 ont permis de préciser un certain nombre de points.

Un autre rapport établissait que la mine de tungstène de Salau (Ariège) présentait en 1982 un impact paysager fort du fait de deux dépôts de stériles non végétalisés, mais une influence très faible sur la qualité des eaux de surface, grâce à la technique de mise en décharge des stériles qui a été adoptée.

Plus récemment ont été signalées par la DDASS, aux maires et à la DRIRE, des teneurs anormales en antimoine dans certaines eaux d'alimentation du Cap Corse, où de nombreux filons de stibine ont été jadis exploités (concessions de Luri, Meria et Ersa). L'examen par le BRGM du réseau torrentiel, de la distribution des sources et de la localisation des points d'analyses anormales a permis de signaler aux autorités que les excès d'antimoine dans les eaux ne pouvaient être attribués systématiquement à la présence de haldes de mine ancienne en amont. Il fallait plus généralement prendre en compte un fond naturel géochimiquement très fort en antimoine, qui a été secondairement concentré dans le bed rock à la faveur de failles (certaines assez richement minéralisées constituant de véritables "filons" de minerai d'antimoine exploitables, d'autres moins richement tapissées de minerai ne constituant que de simples indices de cette substance). Ces failles sont autant de drains et de collecteurs d'eau. Par conséquent, la pollution des eaux est au moins en grande partie d'origine naturelle.

Pareillement, des teneurs en arsenic étaient signalées en 1995 dans les eaux d'arrosage de la plaine de la côte orientale de la Corse, en aval de l'ancienne mine d'arsenic (réalgar) de Matra (Castagniccia), qui est abandonnée depuis 1945 et dont la concession a été renoncée il y a trente ans. Des prélèvements en roche ont permis au BRGM de trouver des teneurs en arsenic allant jusqu'à 0,4 % dans les alluvions des terrasses anciennes quaternaires de cette région, qui prouvent que de l'arsenic descendait déjà (par érosion) en aval du filon de Matra, bien avant l'apparition de l'Homme en Corse (et donc bien avant l'exploitation du filon qui n'a commencé qu'au 20^e siècle.). L'ancienne exploitation minière n'était donc pas la seule responsable, et de loin, de la dispersion de cet élément dans les eaux de ruissellement.

Ces divers exemples montrent que la phase 2 de la présente étude pourrait comporter, parmi ses objectifs, un état des lieux des anciennes mines françaises, que l'on axerait prioritairement sur les mines anciennes pour pallier les lacunes d'information (les mines en activité étant mieux documentées grâce aux contrôles exercés en continu par les exploitants et par les administrations déconcentrées compétentes). Ce travail comporterait un dépouillement des archives et de la bibliographie, puis des contrôles sur le terrain. Il permettrait de mieux cerner dans quelle mesure le temps exerce un effet de neutralisation des risques sur certains sites miniers anciens, tandis que d'autres restent encore des "points noirs" environnementalement parlant, dont les besoins de traitement pourront être hiérarchisés. Un tel inventaire ne serait cependant pertinent que si l'on dispose en parallèle d'éléments de référence sur le fond géochimique régional naturel, permettant de faire la part entre les pollutions d'origine anthropique et les contaminations naturelles intrinsèquement liées à la géologie du site, pour lesquelles les méthodes de traitement doivent être adaptées.

5. Revue sommaire des aspects réglementaires concernant les résidus miniers

5.1. SPECIFICITE DES RESIDUS MINIERES EN MATIERE REGLEMENTAIRE

L'exploitation des mines présente de telles spécificités que le législateur la fait dépendre d'un corpus de dispositions adaptées, baptisé code minier. Cela est vrai dans tous les pays.

La version actuelle du code minier a intégré les dispositions, concernant l'environnement, relatives aux lois :

- sur les déchets (juillet 1992) ;
- sur l'eau (3 janvier 1992) ;
- sur les carrières (4 janvier 1993) ;
- sur le renforcement de la protection de l'environnement (2 février 1995) et les modifications édictées par la loi du 15 juillet 1994 prennent largement en compte les aspects environnementaux.

Le code minier et ses décrets d'application couvrent donc tous les problèmes concernant les résidus provenant de la mine.

Une distinction est apparue il y a quelques années faisant rentrer l'usine de concentration de minerai (laverie) ainsi que les stériles issus de cette usine, dans la catégorie des établissements classés. Sous l'angle technique ce changement administratif n'a rien modifié. La différence réside dans ce que l'ancien exploitant demeure responsable administrativement de ces stériles, même après la renonciation à la concession. Les résidus provenant de la mine *sensu stricto* ne sont plus de la responsabilité administrative de l'exploitant dès lors que la concession a été renoncée.

5.2. LES PRINCIPAUX TEXTES

Deux textes principaux concernent les sites miniers :

- le code minier ;
- la loi du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'Environnement.

Le premier s'intéresse à la mine elle-même, et aux équipements nécessaires à son fonctionnement alors que le second traite des installations industrielles pouvant être nécessaires à la valorisation du minerai.

La version actuelle du code minier intègre les dispositions concernant l'environnement relatives aux lois :

- sur les déchets (juillet 1992) ;
- sur l'eau (3 janvier 1992) ;
- sur les carrières (4 janvier 1993) ;
- sur le renforcement de la protection de l'environnement (2 février 1995) et les modifications édictées par la loi du 15 juillet 1994 prennent largement en compte les aspects environnementaux.

Par ailleurs, des textes plus "thématiques" peuvent également les concerner :

- loi n°F92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement ;
- loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau ;
- décret n° 80-330 du 7 mai 1980 - règlement général des industries extractives ;
- décret n° 95-696 du 9 mai 1995 relatif à l'ouverture des travaux miniers et à la police des mines ;
- instruction relative aux aspects techniques de l'abandon des travaux et installations des exploitations souterraines des mines et des carrières, du 6 août 1991 (ministère de l'Industrie et du Commerce Extérieur) ;
- les décrets d'application de la Loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement, notamment le n° 11.33 du 20/09/77 ;
- loi n° 95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement ;
- loi n° 93-24 du 8 janvier 1993 relative à la protection et la mise en valeur des paysages, et à la modification de certaines dispositions législatives en matière d'enquêtes publiques ;
- loi n° 92-144 du 31 décembre 1992 relative à la lutte contre le bruit.

La notion d'établissements classés comme dangereux, insalubres ou incommodes a été instaurée par la loi du 19 décembre 1917 et la nomenclature des établissements classés a été créée par le décret du 20 mai 1953. La loi du 19 décembre 1917 a été abrogée par celle du 19 juillet 1976 mais la base de la nomenclature du 20 mai 1953 a été maintenue, puis complétée.

Un certain nombre de rubriques de la nomenclature concerne les activités minières, en particulier:

- N° 89 bis : broyage, concassage, criblage, tamisage mécanique de pierres, cailloux, minerais et autres produits minéraux naturels ;
- N° 45-67 : aluminium ;

- N° 61 : réduction des minerais d'antimoine ;
- N° 140 : chlorures métalliques ;
- N° 162 : traitement des minerais de cuivre ou de nickel ;
- N° 292 : minerais carbonatés ;
- N° 292 bis : agglomérations de minerai de fer ;
- N° 293 : laveries à minerais ou résidus métallurgiques.

Par contre, les déchets provenant de ces activités, comme de la mine elle-même, ont échappé à la réglementation commune des déchets industriels. En particulier l'arrêté du 18 décembre 1992 relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux exclut de son champ d'application les "stockages spécifiques des résidus du traitement des minerais".

Cependant il faut noter que la responsabilité de l'exploitant d'une installation ayant été à l'origine d'une pollution est reconnue par le législateur article 81 de la loi n° 95-101 et que la loi n° 94-588 du 15 juillet 1994 a introduit dans le code minier un article 75-2 qui prévoit l'information d'un acheteur de l'existence d'une mine et des dangers ou inconvénients résultant de son exploitation.

5.3. DIFFERENCES ENTRE MINES ANCIENNES ET MINES EN ACTIVITE OU RECEMMENT FERMEES

Dans la présente étude, on a traité de façon prioritaire les problèmes posés par les mines anciennes. En effet, leur cas est fondamentalement très différent de celui des mines qui sont actuellement en activité ou qui ont été fermées récemment. Sur celles-ci, la surveillance exercée par les DRIRE auprès des exploitants et les mesures prises par ces derniers concourent à la conformité environnementale des résidus d'exploitation. En particulier, de nombreux textes législatifs existent concernant les résidus des mines actuelles, les mesures les concernant relèvent d'arrêtés préfectoraux détaillés, les solutions techniques ont été trouvées et sont appliquées. De la sorte, les mines récentes, au demeurant parfaitement répertoriées, ne peuvent être que ponctuellement un sujet de préoccupation pour l'administration centrale.

Au contraire, les mines anciennes dont la surveillance, au temps de leur activité, n'a pas bénéficié de "l'arsenal" des connaissances scientifiques et techniques et des dispositions réglementaires actuellement en vigueur, peuvent constituer un sujet de préoccupation général. Leurs impacts environnementaux éventuels restent très mal documentés à l'heure actuelle.

6. Bibliographie sommaire

Ouvrages généraux :

Environnement-pollutions minières :

Allan R.J. and Salomons W. (1995) - Heavy metal aspects of mining pollution and its remediation. *Journal of Geochemical Exploration Spec. Issue*, vol. 52, n° 1 and 2, 284 p.

Baroudi H., Trolly G. (1996) - L'environnement dans les mines, chapitre X dans le "Memento des Mines et Carrières - 1996", p. 505-525.

Davies B.E. (1983) - Heavy metal contamination from base metal mining and smelting: implications for man and his environment. In *Applied environmental geochemistry*. Academic press, I. Thornton Ed., 501 p.

Fortescue J.A. (1980) - *Environmental Geochemistry. A Holistic approach*. Ed. Springer Verlag. Ecological studies, vol. 25, Ed. Billings Durham, USA, 347 p.

Pasava J., Kribek B., Zak K. (1995) - Mineral deposits : from their origin to their environmental impacts. *Proceedings of the Third biennial SGA meeting (Prague, République Tchèque), août 1995 ; A.A. Balkema (Rotterdam) p. 1018.*

PNUE (1991) - Environnement et exploitation minière de certains métaux non ferreux (Cu, Ni, Pb, Zn, Au) : guide technique. PNUE, Paris, p. 122.

Inventaire des exploitations minières françaises et tonnages exploités :

Béziat P., Bornuat M. (1995) - Carte minière de la France métropolitaine. Echelle 1/1 000 000. Notice explicative. Rapport de Service Public, BRGM, Service Minier National, 102 p.

Blondel F., Marvier L. (1952) - Symposium sur les mines de fer du Monde. Tome II. XIX^e Congrès Géologique International, Alger 1952, 594 p.

Bubenicek L. (1961) - Recherches sur la constitution et la répartition du minerai de fer dans l'Aalénien de Lorraine. *Sciences de la Terre*, t. VIII, n°1-2, 204 p.

Caillaux A. (1875) - Carte minière de la France métropolitaine.

Cheni S.A., MPCS (1990) - Salsigne. Projet de développement par cyanuration. Rapport R31449 DAM PM 90.

- Chermette A. (1960) - Les ressources de la France en Spath Fluor. Ed. Technip, BRGM, 52 p.
- Collectif (1972-1986) - Cartes des gîtes minéraux de la France au 1/500 000. 8 feuilles. Ed. BRGM.
- Cortial Ph., Monthel J. (1990) - Rapport de stage. Formation géologue de mine. Note DAM/DEX n° 1796, 261 p.
- Crouzet J., Tollon F. (1980) - Le gisement stratiforme et filonien de Salsigne, Aude. Au, As(Ag,Cu,Bi). Actes du 26^e CGI, Paris, Fascicule E8, 54 p.
- Lajoinie J.P., Laville P. (1979) - Les formations bauxitiques de la Provence et du Languedoc. Dimension et distribution des gisements. Mémoire du BRGM n° 100.
- Les mines de fer françaises - Rapports d'activité de la Chambre Syndicale des Mines de fer de France (1987-1991).
- Les ressources minières françaises (1978-1991) - 14 volumes concernant Pb-Zn, W, Sn, Sb, Mn, Cu, Au, F, Ba, S, Hg, talc, amiante, andalousite. Rapports Inv. minier métropolitain, inédits.
- Les ressources minières françaises. Annales des mines. Juillet-août 1980, 186^e année, n° 7-8, 191 p. Actes du XXVI^e Congrès Géologique International, Paris.
- Masson J.L. (1977) - L'industrie lorraine du fer ou comment tuer la poule aux oeufs d'or. Ed. Cujas, 473 p.
- Statistique de l'Industrie Minérale - Annales des Mines. Ministère de l'Industrie et de la Recherche. 1960-1977.
- Annuaire de statistique Industrielle (1979-1981) - Ministère de l'Industrie.
- Déchets miniers : typologie-études d'impact.*
- Anonyme (1994) - Inventaire et hiérarchisation de 11 sites industriels potentiellement pollués en région Midi-pyrénées. Rapport de synthèse. Rapport BRGM Service Public, Action MSP n°1994-F-101 pour la DRIRE Midi-Pyrénées, n° R38101, 11 p. Annexe : Fiche d'évaluation sur la mine de Pb, Zn et Ag de Seintein (09).
- Barrès M. (1979) - Comportement hydrodynamique et évolution chimique de déchets miniers fins en décharge (effets sur l'environnement). Etude de la digue à stériles de St Salvy de la Balme (Tarn). Rapport BRGM 79 SGN 662 HYD, 91 p.
- Bourdier G., Lambert J., Sionneau J.M. (1981) - Mine d'or du Bourneix (Haute-Vienne). Etude d'impact pour les installations classées. Rapport BRGM 80 SGN 867 ENV, 65 p.

- Brougère J. (1963) - Usine de la Croix de Pallières. Revue de l'Industrie Minérale.
- Carly R. (1981) - Inventaire des dépôts et rejets miniers. Compte rendu de l'activité 1980. Rapport BRGM, 81 SGN 208 ENV, 76 p. (112 mines métalliques et 86 mines F, Ba, amiante répertoriées).
- Carly R. (1983) - Recueil de données sur le réaménagement des sites miniers. Rapport BRGM 83 SGN 582 ENV, 269 p.
- Lansiart M., Sauter M. (1983) - Constat d'impact de deux anciennes exploitations minières : 2. Le cas de Cheni (Haute Vienne). Rapport BRGM 83 SGN 7721 ENV, 69 p.
- Laville Timsit L., Bonnefoy D. (1985) - Valorisation des données de l'Inventaire géochimique pour la définition de pollutions métalliques dans les Vosges, le Massif central et le Massif Armoricaïn. Rapport 85 DAM 030.
- Libaude J., Marroncle J.L., Morin D., Védrette H. (1992) - Haldes aurifères de l'ancienne mine du Châtelet (Creuse). Caractérisation et évaluation des risques liés au dépôt. Rapport BRGM R35105, 52 p.
- Margron P., Maubert F., Sionneau J.M. (1983) - Etude technico-économique pour l'implantation d'une digue à stérile à Rouez (Sarthe). Rapport BRGM 83 SGN 096 GEG, 64 p.
- Maubert F., Sauter M., Carly R. (1983) - Inventaire des expériences de réaménagement de mines. Rapport BRGM 83 SGN 241 ENV (15 sites réaménagés décrits).
- Maubert F. (1983) - Constat d'impact de deux anciennes exploitations minières : 1. Le cas de la mine de La Croix de Pallières (Gard). Rapport BRGM 83 SGN 583 ENV, 55 p.
- Maubert F. (1982) - Constat d'impact de trois mines souterraines : 2. Le cas de la mine de Salau (Ariège). Rapport BRGM 82 SGN 866 ENV, 81 p.
- Maubert F., Sauter M. (1983) - Impacts résiduels d'anciennes mines. Rapport BRGM 83 SGN 249 ENV, 16 p., 22 fiches de constats sur 22 exploitations du Massif central.
- Rougeaud J., Sauter M. (1984) - Evaluation des possibilités de réutilisation des déchets miniers de la division minière du Massif central. Rapport BRGM 84 SGN 095 ENV (229 sites visités dont 103 sites de déchets miniers répertoriés, localisés : Division minière Massif central, 87 000 km²).
- Sauter M. (1982) - Constat d'impact de trois mines souterraines : 3. Le cas de la mine de Salsigne (Aude). Rapport BRGM 82 SGN 867 ENV, 95 p.

ANNEXE

PROPOSITION DE GLOSSAIRE

L'étude des résidus miniers faisant appel à la fois aux vocabulaires de la mine et de la gestion des sites pollués, il nous a paru utile de réunir dans un glossaire les mots ou les expressions relevant de ces deux domaines. Occasionnellement, des définitions sont proposées pour des termes dont la signification précise n'a pas été trouvée dans les sources consultées.

L'objectif est que tous les intervenants futurs (opérateurs et utilisateurs) sur ce projet "Résidus Miniers" puissent employer un même langage, parfaitement ciblé. Ceci n'exclut pas que ce vocabulaire puisse évoluer et s'enrichir au cours de l'étude, de façon à s'adapter et à répondre aux données recueillies comme aux problématiques rencontrées.

Anomalie géochimique : fortes teneurs dues à des causes naturelles.

Bruit de fond*** : concentration ambiante en un élément, en un composé, ou en une substance dans un milieu donné ; elle tient compte des concentrations naturelles (fond géochimique naturel) et de celles provenant éventuellement de sources d'origine anthropique autres que celles du site étudié.

Contamination*** : présence anormale d'une substance dans un milieu qui, à son tour, devient susceptible de constituer une source ou un vecteur de pollution pour son entourage (sens appliqué à la gestion des sites potentiellement pollués). Plus généralement, augmentation de teneurs en éléments traces ayant pour cause une activité anthropique. Ce terme ne préjuge pas de la nocivité de cette augmentation ni du risque qu'elle peut faire encourir à l'homme ou à l'écosystème. Des analyses sont nécessaires pour les préciser.

Contamination et anomalie : se repèrent uniquement à la teneur globale en un élément. Il n'est pas préjugé par ces mots de la disponibilité soit physico-chimique, soit biologique des éléments traces.

Déblais** : matériaux excavés.

Fond géochimique naturel*** : concentration naturelle en un élément, en un composé, ou en une substance dans un milieu donné, en l'absence de tout apport extérieur spécifique, tel que l'activité humaine.

Haldes (définition proposée) : il n'a pas été trouvé de définition pour ce terme qui fait néanmoins partie du vocabulaire minier usuel (code minier inclus). Il semble que l'on puisse désigner sous cette appellation l'ensemble des déblais pierreux, minéralisés ou non, qui résultent de l'exploitation minière.

Lixiviation*** : mouvement de substances dissoutes causé par la percolation de l'eau dans un milieu solide (ce milieu solide peut être un sol, une roche, des résidus, etc.).

Minerai* : roche présentant une concentration suffisamment élevée en minéraux utiles pour qu'il soit envisageable de l'extraire d'une façon rentable dans des conditions économiques raisonnablement imaginables, où lorsqu'il se présente en quantité suffisante.

Par extension, roche présentant une concentration assez élevée en minéraux utiles pour qu'il ait été envisagé de l'exploiter dans une époque donnée. Un minerai peut contenir également des minéraux sans valeur qui constituent la gangue.

Minerai tout-venant* : minerai arrivant à l'entrée du processus de concentration. Actuellement, c'est généralement à l'entrée d'une usine (laverie). Dans le passé les premiers processus, pouvaient se faire dans la mine par *scheidage*. Le minerai en résultant est appelé *minerai scheidé*.

Par opposition et plus généralement, on appelle "tout-venant" (en anglais *run of mine ore*) le minerai tel qu'il est extrait de la mine, c'est-à-dire un mélange de minerai *stricto sensu* et du stérile qui n'a pu en être séparé par l'exploitation.

Polluant*** : produit, substance, élément chimique responsable d'une pollution ; on distingue les polluants primaires, rejetés directement dans le milieu naturel, et les polluants secondaires qui proviennent de la dégradation des premiers.

Pollution*** : lorsque la contamination présente des risques potentiels, on l'appelle pollution. Au sens littéraire, c'est l'action de souiller, de rendre malsain (Petit Larousse) ; moins subjectivement on la définit comme la dégradation d'un milieu donné par l'introduction d'un agent physique, chimique, biologique (sens général, P.R.) ; toute action (humaine) qui contribue à accroître les concentrations naturelles en éléments naturellement présents dans les différents milieux récepteurs (eau, sol, air), qui peut avoir un impact (néfaste) sur un milieu (air, sol, sous-sol, eaux superficielles ou souterraines, écosystème) ou sur un bien meuble ou immeuble, les rendant ainsi impropres à un usage déterminé.

Résidu minier (définition proposée) : tout produit ou dépôt qui résulte de la recherche et de l'exploitation minière ou du traitement du minerai ; ces résidus peuvent être des produits naturels (stériles francs, produits minéralisés non exploitables) ou des produits artificiels, plus ou moins transformés, issus des phases de traitement et d'enrichissement du minerai (rejets de laverie, scories) contenant d'éventuels additifs chimiques, minéraux ou organiques.

Remblai** : matériau mis en dépôt. S'oppose au matériau en place (ou *in situ*). Volume constitué par ce matériau.

Scheidage : tri manuel du minerai.

Site minier orphelin*** : site dont le responsable n'est pas connu ou est insolvable (notamment du fait du montant des travaux à engager pour réduire ou supprimer les risques constatés) ; un site est reconnu orphelin par décision des ministères concernés (Environnement, Industrie) qui peuvent faire exécuter d'office les études, traitements et actions de toute nature pour en maîtriser, autant que faire se peut, l'impact sur la sécurité et la salubrité publiques, sur l'environnement.

Sol : forme naturelle de la surface résultant de la transformation de roche-mère sous-jacente sous l'influence de processus physiques, chimiques et biologiques. Les caractères et les épaisseurs d'un sol sont très variables.

Stérile* : roche dont les concentrations éventuelles en substance utile sont jugées non valorisables. Techniquement on distingue :

- les stériles francs ;
- les stériles de sélectivité ;
- les stériles de traitement (tailings).

On pourrait d'ailleurs considérer pour certains minerais (dont l'or) que les stériles de traitement sont également des stériles de sélectivité puisqu'ils sont souvent retraités lorsque la technique a progressé ou que le cours du métal a augmenté.

Stérile franc* : roche ne présentant aucune concentration anormale en éléments utiles.

Stérile de sélectivité : avec la définition de minerai donné ci-dessus, le stérile se définit comme minerai dont les teneurs sont jugées non économiques au moment de l'extraction.

Terril** : dépôt de produits stériles, généralement conique, constitué par décharge ponctuelle.

Verse** : dépôt de produits dont la partie supérieure est une plate-forme.

Sources:

- * Vocabulaire de la mine souterraine, revue Industrie minérale, supplément à décembre 1982.
- ** Vocabulaire de l'exploitation à ciel ouvert, revue Industrie minérale, supplément à janvier 1987.
- *** BRGM, rapport R 38184 UPE SGN 94. Gestion des sites (potentiellement) pollués. Etude des sols. Guide technique. Annexe 14, Glossaire.
- P.R. : Petit Robert. D'abord, qu'est-ce qu'on entend par *l'environnement* d'une mine ?

